

---

**RAIDSEPELIN LUJUUDEN VAIKUTUS  
TUKIKERROKSEN KESTOIKÄÄN**



**Antti Nurmikolu**

# **RAIDSEPELIN LUJUUDEN VAIKUTUS TUKIKERROKSEN KESTOIKÄÄN**

**O Antti Nurmikolu**



**RHK**  
RATAHALLINTOKESKUS  
KAIVOKATU 6, PL 185  
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111  
FAX. (09) 5840 5100  
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-032-1  
ISSN 1455-2604

**Nurmikolu, Antti: Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään.** Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 2000. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. 93 sivua ja 4 liitettä. ISBN 952-445-032-1, ISSN 1455-2604.

**Avainsanat:** raidesepeli, tukikerros, jauhautuminen, hienoaines, lujuus, kestoikä, elinkaarikustannus

## TIIVISTELMÄ

Tämä työ sisältää kirjallisuuteen, rakeisuustietokantaan, sekä kenttä- ja laboratorioko-keisiin pohjautuvan tutkimuksen raiteen tukikerroksen hienoainespitoisuuteen vaikuttavista tekijöistä ja hienoaineksen vaikutuksista tukikerroksen toimintaan. Erityisesti on tarkasteltu kiviaineksen lujuuden merkitystä raidesepelin jauhautumiseen, tukikerroksen kestoikään ja edelleen tukikerroksen elinkaarikustannuksiin. Päätaavoitteena on ollut luoda arviointiperuste elinkaaritaloudellisesti edullisimman raidesepelilaadun valinnalle.

Tukikerroksen hienoainespitoisuuden yhteys tukikerrosta kuormittaneeseen kumulatiiviseen liikennemäärään arvioidaan likimäärin lineaariseksi. Sitä vastoin akselipainon korotus 25 tonnista 35 tonniin ei lisää jauhautumista merkittävästi silloin, kun raidesepeli on suhteellisen lujaa.

Betoniratapölkkyraiteessa jauhautuminen on selvästi puuratapölkkyraidetta suurempaa. Jauhautumista lisää myös erilaiset radan epäjatkuvuuskohdat, joissa tukikerrokseen kohdistuu dynaamista kuormitusta.

Tukikerroksen hienoainespitoisuutta voidaan arvioida eri tavoin. Perinteinen tapa on radasta otetun näytteen seulonta. Tukikerroksen kestoikää eli puhdistusrajaa vastaavaa kumulatiivista liikennemäärää voidaan arvioida seuraamalla hienoaineksen määrän kehitystä tukikerroksessa tai olettamalla kehitys kumulatiiviseen liikennemäärään nähden lineaariseksi. Rakeisuustietokannan ja liikennemäärätietojen perusteella on arvioitu eri rataosien tukikerroksille jäljellä olevaa kestoikää.

Valituilta betoniratapölkkyosuuksilta testattujen kiviainesten lujuudet korreloivat kohtuullisesti arvioidun kestoiän kanssa. Tukikerroksen kestoikään vaikuttaa luonnollisesti lujuuden lisäksi muutkin tekijät.

Tukikerroksen elinkaarikustannus koostuu hankinta- ja kunnossapitokustannuksista. Tutkitun lujuuden ja kestoiän välisen yhteyden pohjalta on arvioitu tukikerroksen puhdistuksesta aiheutuvien kustannusten nykyarvoa eri raidesepelilaaduille. Elinkaarikustannustarkastelussa on huomioitu lisäksi tukikerroksen jäännösarvo. Näiden kahden tekijän yhteisvaikutuksena on saatu kullekin raidesepelilaadulle ns. lisäkustannus tietyllä vuotuisella liikennemäärällä. Raidesepelin valinta voidaan tehdä elinkaaritaloudellisuuteen perustuen vertailemalla sepelitarjousten hankinta- ja lisäkustannusten summaa.

Korkealaatuisen raidesepelin käyttö on edullisempaa suuria vuotuisia liikennemääriä välittävillä raiteilla kuin vähän liikennöidyillä raiteilla.



**Nurmikolu, Antti: Effects of Strength on the Life Cycle of Railway Ballast.** Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 2000. Publications of Finnish Rail Administration A 4/2000. 93 pages and 4 appendices. ISBN 952-445-032-1, ISSN 1455-2604.

**Keywords:** railway ballast, ballast bed, degradation, fouling, strength, life cycle, life cycle cost

## SUMMARY

This study focuses on factors effecting the content of fouling in ballast beds and effects of fouling on the functions of the ballast bed. Research is based on a literature review, degradation database and laboratory investigations of ballast samples. Particular interest is paid to the effects of ballast strength on ballast degradation, ballast life cycle and, ultimately, on life cycle costs of ballast. The main result of the study has been the creation of a life cycle economics basis for the selection of ballast grade.

The correlation between content of fouling and cumulative load (traffic) is estimated to be approximately linear. Raising of the ballast load from 25 to 35 tons has no significant effect on the degradation of ballast.

Ballast degradation under concrete sleepers is higher than that under timber sleepers. Degradation is also increased in elastic discontinuity sections of track due to amplification of the dynamic load applied to the ballast bed in these sections.

The content of fouling can be investigated in numerous ways. The traditional method is sieving of ballast samples. This study investigates increases in the content of fouling. Exceeding of ballast life, the cumulative traffic when the content of fouling has exceeded the limit of cleaning, can be estimated by measuring the increase of fouling or assuming the increase is linear to cumulative traffic load. Based on the degradation database, the ballast life of certain sections of track are calculated.

Correlation of ballast test strength on certain concrete ties with evaluated ballast life was good.

Life cycle costs of ballast consists of purchasing and maintenance costs. The present cost of cleaning is evaluated from the correlation between ballast strength and ballast life for the different ballast quality grades. The remaining value of the ballast bed is also calculated. Additional costs of the individual ballast quality grades under certain annual traffic loads is determined by the sum of these two factors. Selection of ballast based on life cycle economy is now possible by comparing the additional and purchasing costs of ballast beds.

The use of high grade ballast is more economical when the annual traffic load is high than on lines carrying low traffic volumes.

## ESIPUHE

Tämä tutkimus pohjautuu diplomityöhön, jonka on tehnyt Antti Nurmikolu Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laitoksella. Työtä on ohjannut FM Pasi Niskanen Tampereen teknillisestä korkeakoulusta ja työn ovat tarkastaneet professori Raimo Uusinoka Tampereen teknillisestä korkeakoulusta ja diplomi-insinööri Pasi Leimi Ratahallintokeskuksesta.

Kohta 5.4.3 poikkeaa diplomityöstä, koska se on päivitetty vastaamaan vuoden 1999 rakeisuustutkimus- ja sepelöintitilannetta.

Helsingissä, heinäkuussa 2000

Ratahallintokeskus  
Tekninen yksikkö



# SISÄLLYSLUETTELO

|  |    |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ.....   | 3  |
| SUMMARY .....  | 4  |
| ESIPUHE .....  | 5  |
| SISÄLLYSLUETTELO .....   | 6  |
| KÄYTETYT LYHENTEET .....   | 8  |
| 1. JOHDANTO.....   | 9  |
| 2. RADAN RAKENNE.....  | 10 |
| 2.1 Rata .....   | 10 |
| 2.2 Radan rakenneosat.....   | 10 |
| 2.3 Radan normaalipoikkileikkaukset .....  | 11 |
| 3. TUKIKERROS.....   | 13 |
| 3.1 Yleistä.....   | 13 |
| 3.2 Tukikerroksen mitat.....   | 13 |
| 3.3 Tukikerroksen tehtävät .....   | 16 |
| 3.4 Vaatimuksia raideseapelille .....  | 16 |
| 3.4.1 Raideseapeliltä vaaditut ominaisuudet .....                                | 16 |
| 3.4.2 RHK:n nykyiset vaatimukset raideseapelille .....                           | 16 |
| 3.4.3 EU:n vaikutus raideseapelin tutkimusmenetelmiin .....                      | 19 |
| 3.5 Kuormituksen jakautuminen tukikerroksessa .....                              | 19 |
| 4. HIENOAINES TUKIKERROKSESSA .....  | 24 |
| 4.1 Hienoaineksen vaikutukset tukikerroksen toiminnalle.....                     | 24 |
| 4.2 Tukikerroksen hienoaineksen lähteet .....                                    | 26 |
| 4.3 Raideseapelin jauhautuminen .....  | 28 |
| 4.3.1 Sepeliperäinen hienoaines tukikerroksessa .....                            | 28 |
| 4.3.2 Jauhautumisen yhteys raiteen epätasaisuuteen .....                         | 29 |
| 4.3.3 Kumulatiivisen liikennemäärän vaikutus jauhautumiseen.....                 | 30 |
| 4.3.4 Akselipainon vaikutus jauhautumiseen.....                                  | 30 |
| 4.3.5 Raideseapelin radassaoloajan vaikutus jauhautumiseen.....                  | 31 |
| 4.3.6 Kiviaineksen laadun vaikutus jauhautumiseen.....                           | 31 |
| 4.3.7 Ratapölkkyateriaalin vaikutus jauhautumiseen .....                         | 32 |
| 4.3.8 Kiskotyypin vaikutus jauhautumiseen .....                                  | 32 |
| 4.3.9 Raidegeometrian ja kuljetuskaluston kunnan vaikutus<br>jauhautumiseen..... | 33 |
| 4.3.10 Kunnossapidon vaikutus jauhautumiseen .....                               | 33 |
| 4.4 Hienoainespitoisuuden arviointi.....   | 37 |
| 4.4.1 Näytteenotto manuaalisesti.....  | 37 |
| 4.4.2 Näytteenotto mekaanisesti.....   | 39 |
| 4.4.3 Radiometriset menetelmät.....  | 41 |
| 4.5 Tukikerroksen puhdistusraja.....   | 42 |
| 4.6 Jauhautumista pienentäviä seikkoja.....                                      | 44 |
| 5. TUKIKERROKSEN ELINKAARIKUSTANNUKSET .....                                     | 45 |
| 5.1 Yleistä.....   | 45 |
| 5.2 Rakentamiskustannukset.....  | 45 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.3   | Kunnossapitokustannukset.....   | 48 |
| 5.3.1 | Yleistä .....   | 48 |
| 5.3.2 | BALLAST2 – malli elinkaarikustannusten minimoimiseksi .....               | 48 |
| 5.4   | Kestoikä .....  | 53 |
| 5.4.1 | Yleistä .....   | 53 |
| 5.4.2 | Olemassa olevat arviot tukikerroksen kestoikästä.....                     | 54 |
| 5.4.3 | Kestoiän arviointi RHK:n laajan rakeisuustutkimuksen perusteella .....    | 56 |
| 6.    | KENTTÄ- JA LABORATORIOTUTKIMUKSET .....                                   | 63 |
| 6.1   | Yleistä .....   | 63 |
| 6.2   | Näytteenotto-osuudet.....   | 63 |
| 6.3   | Rakeisuustutkimuksen määritys .....                                       | 66 |
| 6.3.1 | Rakeisuustutkimuksen näytteenotto.....                                    | 66 |
| 6.3.2 | Rakeisuustutkimuksen määritys.....  | 68 |
| 6.4   | Kiviaineksen lujuuden ja muodon arviointi.....                            | 68 |
| 6.4.1 | Lujuuskoe näytteenotto .....  | 68 |
| 6.4.2 | Lujuuskokeet ja muotoarvon määritykset .....                              | 69 |
| 7.    | KOETULOKSET .....   | 71 |
| 7.1   | Rakeisuustutkimus .....   | 71 |
| 7.1.1 | Mitatut rakeisuustutkimukset.....   | 71 |
| 7.1.2 | Näytteenottomenetelmän luotettavuus.....                                  | 71 |
| 7.1.3 | Tukemisen vaikutus hienoaineksen määrään .....                            | 72 |
| 7.2   | Lujuustutkimus .....  | 74 |
| 7.2.1 | Lujuus- ja muotoarvotulokset.....   | 74 |
| 7.2.2 | Louhoksesta ja radasta otetun näytteen lujuusero .....                    | 78 |
| 7.2.3 | Muotoarvon määritysmenetelmien korrelaatio.....                           | 79 |
| 7.2.4 | Raidesepelin laadun yhteys kestoikään .....                               | 79 |
| 8.    | JOHTOPÄÄTÖKSET .....  | 82 |
| 8.1   | Kiviaineksen lujuuden vaikutus tukikerroksen elinkaarikustannukseen ..... | 82 |
| 8.2   | Raidesepelin rataosakohtaisen laatuvaatimuksen tarpeettomuus .....        | 84 |
| 8.3   | Seulonnan yhteydessä rataa palautettavan kiviaineksen lujuus .....        | 85 |
| 8.4   | Rakeisuustutkimuksen näytteenoton menetelmä.....                          | 85 |
| 8.5   | Puhdistusrajan määritys .....   | 86 |
| 9.    | YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET .....                               | 87 |
|       | LÄHDELUETTELO .....   | 89 |
|       | LIITTEET  |    |
|       | Liite 1 Tukikerroksen silmämääräinen arviointi                            |    |
|       | Liite 2 Rakeisuustutkimuksen tulokset, rakeisuuskäyrät                    |    |
|       | Liite 3 Kivilajien osuudet otetuissa lujuusnäytteissä                     |    |
|       | Liite 4 Ohuthieanalyysit (FM Pasi Niskanen)                               |    |



## KÄYTETYT LYHENTEET

|                |  |
|----------------|--|
| AAR            | Association of American Railroads  |
| A <sub>N</sub> | Abrasion number, Pohjois-Amerikassa käytössä oleva kiviaineksen lujuutta kuvaava indeksi.                                    |
| BR             | British Rail (Iso-Britannia)   |
| CN             | Canadian National Rail (Kanada)  |
| CP             | Canadian Pacific Rail (Kanada)   |
| DB             | Deutsche Bahn (Saksa)  |
| EAC            | Equivalent annual cost (ekvivalentti vuotuinen kustannus)  |
| ERRI           | European Rail Research Institute   |
| EVK            | Ekvivalentti vuotuinen kustannus   |
| FAST           | Facility for Accelerated Service Testing   |
| HA             | Haurausarvo  |
| HAL            | Heavy axle load  |
| JBV            | Jernbaneanverket (Norja)   |
| KM             | Kuulamylyarvo  |
| MAV            | Maguar Allamvasulak (Unkari)   |
| MGT            | Miljoonaa bruttotonnia kumulatiivisesta liikennemäärästä puhuttaessa.<br>(Millions of gross tonnage)                         |
| NS             | Nederländische Stahlbahn (Alankomaat)  |
| PVI            | Particle void index. Näytteen rakeisuuskäyrän ja PVL:n välinen pinta-ala, joka kuvaa raidesepelin jäljellä olevaa kestoikää. |
| PVL            | Particle void limit. Sellaisen raidesepelin rakeisuuskäyrä, jonka tyhjätila on hienoaineksen täyttämä.                       |
| RHK            | Ratahallintokeskus   |
| SBB            | Schweizerische Bundesbahnen (Sveitsi)  |
| SKI            | Suorituskykyindeksi. Kuvaa kumulatiivista liikennemäärää suhteessa rata-<br>osuuden keskimääräiseen rakeisuuslukuun.         |
| SJ             | Statens Järnvägar (Ruotsi)   |
| SNCF           | Societe National des Chemins de Fer (Ranska)   |

## 1. JOHDANTO

Raidesepeli muodostaa raiteen tukikerroksen rautatiessä. Tukikerroksen tärkein tehtävä on ilman pysyviä muodonmuutoksia pystyä jakamaan ratapölkkyjen siihen kohdistama liikennekuormitus radan alempien rakennekerrosten sallimalle tasolle. Lisäksi tukikerroksen tulee tukea raidetta pysty- ja sivusuunnassa.

Rasitus, joka raidesepeliin tukikerroksessa kohdistuu on sanottu olevan suurin kaikista luonnonrakennusmateriaaleihin kohdistuvista rasituksista. Toistuvan kuormituksen johdosta raidesepeli jauhautuu synnyttäen haitallista hienoaainesta tukikerrokseen. Tietyn kumulatiivisen kuormituksen jälkeen tukikerros ei enää pysty täyttämään sille asetettuja tehtäviä, jolloin muodostunut hienoaines on poistettava ja korvattava uudella karkealla raidesepelillä. Tällöin on saavutettu tukikerroksen kestoikä.

RHK käyttää vuosittain uuden raidesepelin hankintaan kymmeniä miljoonia markkoja. Ongelmana RHK:n raidesepelin laadun valinnassa on se, että valinta perustuu rataosuuksien vuotuisten liikennemäärien pohjalta laadittuun laatuvaatimukseen, jonka pyrkimyksenä on ainoastaan saavuttaa tukikerrokselle asetettu 40 vuoden käyttöikävaatimus. Tällainen tiukka rataosakohtainen vaatimus ei aina ole taloudellisesti edullisin, koska siinä ei oteta huomioon eroja erilaatuisten sepelien hankintakustannuksissa.

Tästä syystä olisi tärkeää kyetä arvioimaan sepelin laadun vaikutusta tukikerroksen kestoikään. Kun tarkasteluun liitetään hankintakustannukset, voidaan erilaatuisilla sepeleillä saavutettavia, koko kestoikälle tasan jaettu elinkaarikustannuksia vertailla ja valita niistä edullisin vaihtoehto.

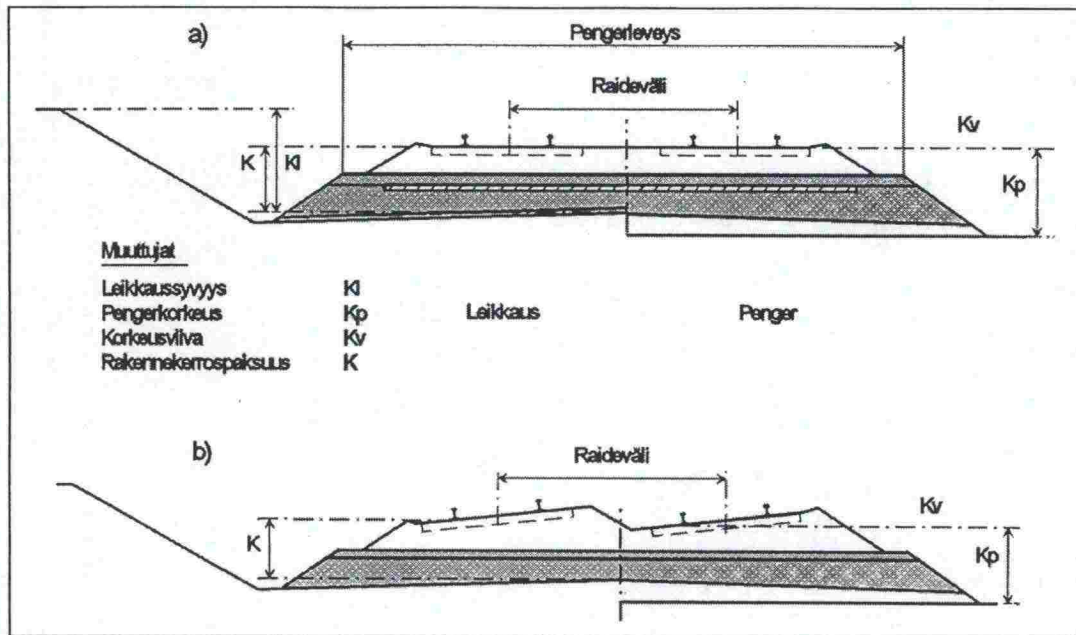
Tutkimuksen tavoitteena oli luoda peruste, jolla voidaan arvioida elinkaaritaloudellisesti edullisin raidesepelilaatu tiettyihin olosuhteisiin.

Tutkimuksen teoreettiseksi pohjaksi kappaleissa 2-4 selvitetään kirjallisuuteen perustuen radan rakennetta, raiteen tukikerrosta ja kuormituksen vaikutusta raidesepeliin. Kappaleessa 5 syvennyttään tukikerroksen elinkaarikustannuksiin vaikuttaviin tekijöihin ja elinkaarikustannusten arviointiin. Kappaleen lopuksi esitetään RHK:n rakeisuusluketietokannan sekä kumulatiivisten liikennemäärien pohjalta tehtyjä arvioita tukikerrosten suorituskyvyistä. Lisäksi esitetään kehitetty tukikerrokseen kestoian arviointiperiaate.

Kappaleessa 6 kuvataan tehty kettä- ja laboratoriotutkimukset. Lopuksi esitellään saadut tulokset ja tehty johtopäätökset. Merkittävin tulos on arvio tukikerroksen kestoistä raidesepelin lujisuuden suhteen. Johtopäätöksenä on esitetty työn tavoite eli elinkaaritalouteen perustuva raidesepelin laadun valintaohje, joka huomioi sepelin hankintakustannuksen ja kestoian.



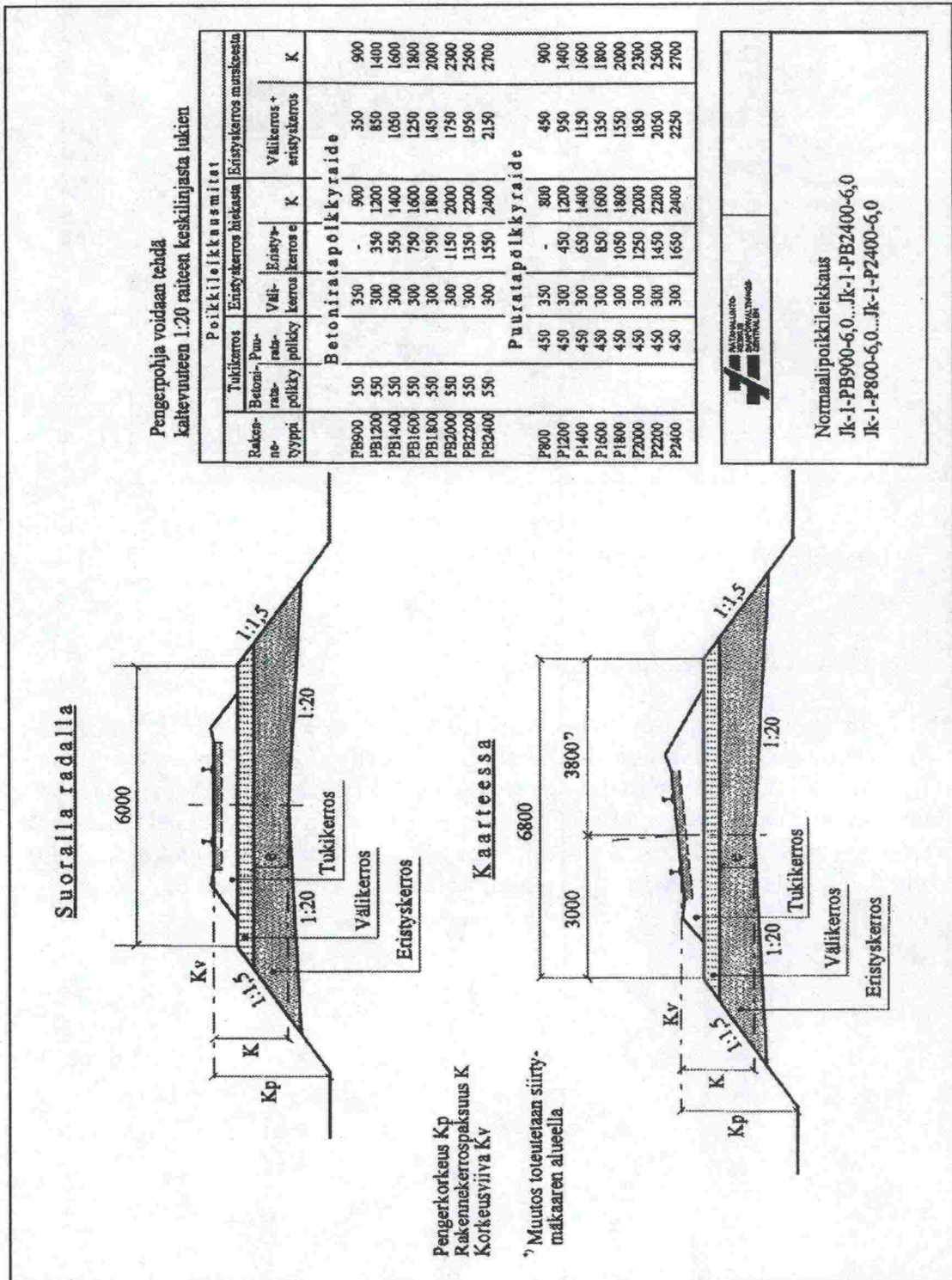




Kuva 2.2 a) Radan dimensioiden nimityksiä ja  
b) niiden tulkinta, kun rata sijaitsee kaarteessa. [41].

### 2.3 Radan normaalipoikkileikkaukset

RAMO 3 -luonnoksessa [41] on radan rakenteesta laadittu normaalipoikkileikkaukset, joissa on esitetty rakennetyyppien minimimitat. Normaalipoikkileikkauksia on eri tyyppisiä riippuen sallitusta nopeudesta sekä siitä, onko kyseessä maaleikkaus, penger vai kallioleikkaus. Lisäksi kaksiraiteisille radoille on omat normaalipoikkileikkauksensa. Kolme- tai useampiraiteisen radan poikkileikkaus muodostetaan yksi- ja kaksiraiteisen radan poikkileikkauksista. Kuvassa 2.3 on esimerkki normaalipoikkileikkauksesta.



Kuva 2.3

Radan normaalipoikkileikkaus penkereen kohdalla, kun sallittu nopeus on alle 200 km/h [41].



### 3. TUKIKERROS

#### 3.1 Yleistä

Tukikerrosmateriaalina käytetään tavallisesti luonnonkiviaineksesta tehtyä raidesepeä, mikä on pitkäaikaisen kokemuksen nojalla osoittautunut parhaaksi materiaaliksi [21].

#### 3.2 Tukikerroksen mitat

RAMO 3-luonnoksessa [41] tukikerroksen mitat määräytyvät sallitun nopeuden, kiskonpituuden, sekä tukikerros- ja ratapölkkyateriaalin perusteella. Tukikerroksen korkeus lasketaan korkeusviivan eli kiskon alapinnan tasosta alaspäin. Tukikerroksen korkeuden ja leveyden määräytyminen on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukossa esiintyvät raidetyypit jaotellaan kiskon pituuden mukaan seuraavasti: Jatkuvakiskoraiteessa kiskon pituus on yli 300 metriä. Pitkäkiskoraiteessa kiskon pituus on välillä 25-50 metriä ja lyhytkiskoraiteessa alle 25 metriä [41].

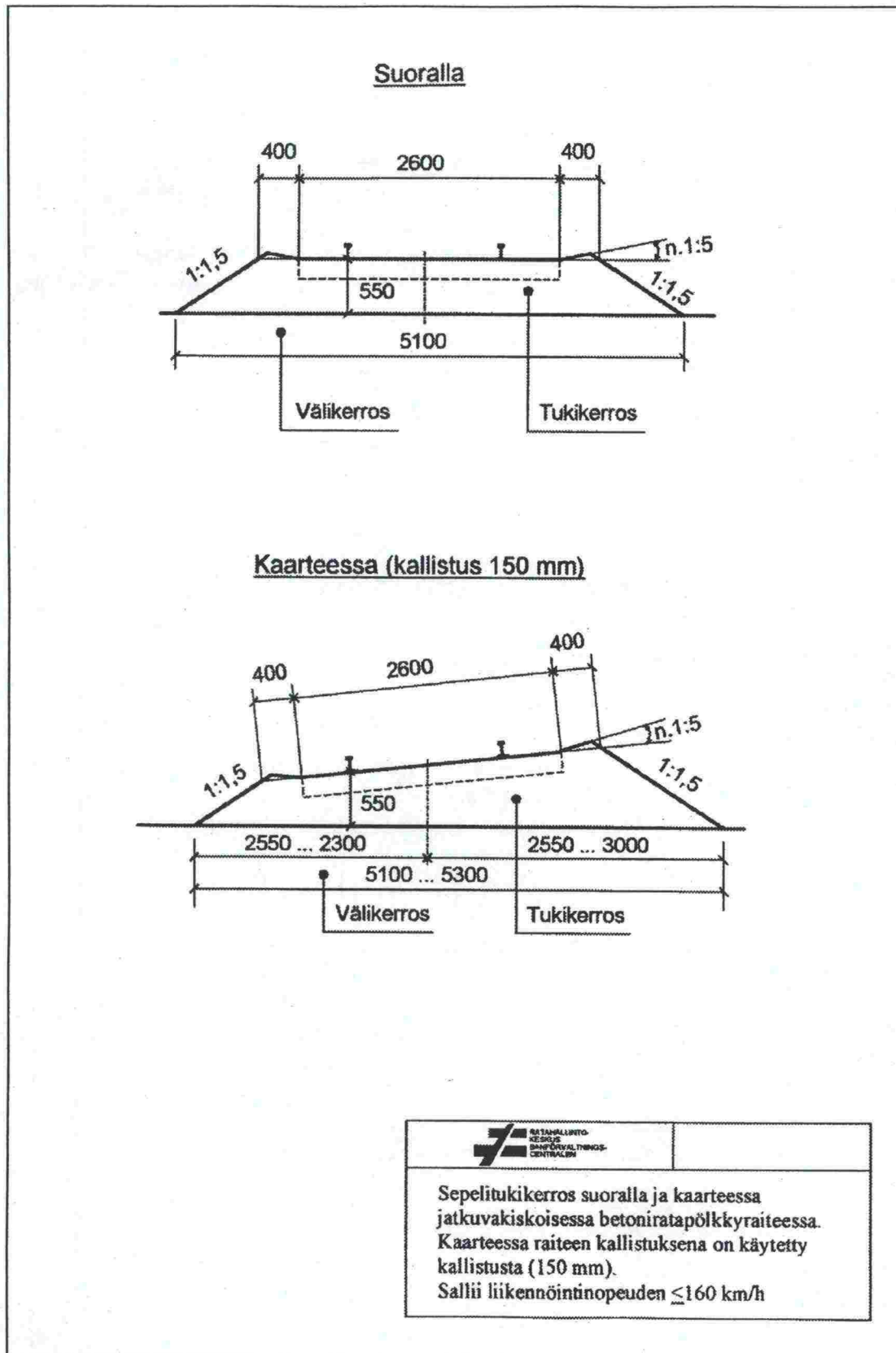
Jatkuvakiskoraiteessa vaaditaan puuratapölkkyosuudella 450 mm ja betoniratapölkkyosuudella 550 mm tukikerrospaksuutta [41]. Jatkuvakiskoraide edellyttää myös ratapölkkyjen päiden ulkopuolella pallea, korotusta, joka parantaa raiteen sivuttaisvastusta [54]. Vaihdealueella käytetään 550 mm tukikerrospaksuutta.

RAMO 3-luonnoksessa [41] on esitetty normaalipoikkileikkauksia yksi- ja kaksiraiteisen radan tukikerrokselle eri tyyppisissä tapauksissa riippuen ratapölkky- ja raidetyypistä sekä sallitusta nopeudesta. Kuvassa 3.1 on esimerkkinä jatkuvakiskoisen, yksiraiteisen betoniratapölkkyradan tukikerroksen normaalipoikkileikkaus, kun sallittu nopeus on 160 km/h.

Taulukko 3.1 Tukikerroksen mitoitusperusteet [41].

| Raiteen ja tukikerroksen tyyppi |                   |       | Tukikerroksen paksuus                    | Tukikerroksen leveys pölkyn päiden ulkopuolella  |
|---------------------------------|-------------------|-------|--|--|
| Jatkuva-kiskoraide ja sepeli    | $v \leq 160$ km/h | linja | 450 mm<br>(puuratapölkkyt)               | 400 mm<br>(palle, ei kuitenkaan raiteiden välissä tai kun raide rajoittuu kiinteään esteeseen tai kun $v \leq 120$ km/h) |
|                                 |                   |       | 550 mm<br>(betoniratapölkkyt)            |  |
|                                 | $v > 160$ km/h    | linja | 550 mm<br>(betoniratapölkkyt)            | 500 mm<br>(palle, ei kuitenkaan raiteiden välissä tai kun raide rajoittuu kiinteään esteeseen)                           |
|                                 |                   |       | 550 mm                                   |  |
| Pitkäkiskoraide ja sepeli       | linja             |       | 350 mm <sup>1)</sup><br>(puuratapölkkyt) | 300 mm <sup>1)</sup><br>(ei palletta)  |
|                                 |                   |       | 450 mm<br>(puuratapölkkyt)               | 400 mm<br>(ei palletta)  |
|                                 |                   |       | 550 mm<br>(betoniratapölkkyt)            |  |
|                                 | vaihde            |       | 550 mm                                   | 400 mm<br>(ei palletta)  |
| Lyhytkiskoraide ja sepeli       | linja             |       | 350 mm <sup>1)</sup><br>(puuratapölkkyt) | 300 mm<br>(ei palletta)  |
|                                 |                   |       | 450 mm<br>(puuratapölkkyt)               |  |
|                                 |                   |       | 550 mm<br>(betoniratapölkkyt)            |  |
|                                 | vaihde            |       | 550 mm                                   | 300 mm<br>(ei palletta)  |
| Lyhytkiskoraide ja raidesora    | linja             |       | 450 mm                                   | 600 mm<br>(ei palletta)  |
|                                 | vaihde            |       | 550 mm                                   | 600 mm<br>(ei palletta)  |

1) Vajaa tukikerros. Päälysrakenne vastaa ominaisuuksiltaan soratukikerroksellista Lk-raidetta. Suurin sallittu nopeus on  $v \leq 110$  km/h.



Kuva 3.1 Tukikerroksen normaalipoikkileikkaus jatkuvakiskoraiteessa, kun sallittu nopeus on 160 km/h [41].



### 3.3 Tukikerroksen tehtävät

Tukikerroksen tärkeimmät tehtävät ovat:

- kestää ratapölkyn välittämä liikennekuorma
- tukea raidetta pysty- ja sivusuunnassa, jotta raidegeometria säilyy
- pienentää ratapölkyn välittämät jännitykset alemman rakennekerroksen sallimalle tasolle
- sitoa liikenteestä syntyvää dynaamista energiaa ja vaimentaa siten tärinää
- omata riittävästi tyhjätillaa, jotta hienoaines voi valua ja varastoitua tukikerroksen pohjalle
- ei saa pidättää vettä päällysrakenteessa
- olla helposti tuettavissa, jolloin virheet raiteen geometriassa voidaan korjata [50], [34], [22].

### 3.4 Vaatimuksia raideseapelille

#### 3.4.1 Raideseapeliltä vaaditut ominaisuudet

Tukikerrokselta edellisessä kohdassa vaadittujen tehtävien toteutumista ajatellen edullisia kiviaineksen ominaisuuksia ovat:

- hyvä iskevän kulutuksen kesto, sitkeys
- hyvä hiovan kulutuksen kesto, kovuus
- kuutiomainen, terävasärmäinen raemuoto
- suuri sepelirakeiden välinen kitka
- mahdollisimman pieni kemiallinen - ja mekaaninen rapautumisalttius
- mahdollisimman vähäinen hienoainespitoisuus
- kiviaineksesta syntyvän hienoaineksen hyvä vedenläpäisevyys ja huono vedensitomiskyky
- tukikerrokseen sopiva raekokojakauma [8], [34], [44], [45], [19].

#### 3.4.2 RHK:n nykyiset vaatimukset raideseapelille

RHK:n nykyisin käyttämän karkean raideseapelin rakeisuusalue on 32 - 64 mm [60]. Vuoteen 1995 saakka käytössä oli rakeisuusalue 25 - 55 mm [59], joten valtaosa rata-verkkomme raideseapelistä on rataan asennettaessa ollut tätä raekokoa.

Tukikerroksen toimivuuteen vaikuttavat kiviaineksen ominaisuudet RHK edellyttää tutkittavan taulukossa 3.2 esitetyillä tutkimusmenetelmillä [60].

*Taulukko 3.2 Raideseapelin tutkimusmenetelmät [60].*

| Tutkittava ominaisuus               | Tutkimusmenetelmä                      |
|-------------------------------------|--|
| Iskunkesto                          | Haurausarvokoe                         |
| Hioutuvuudenkesto                   | Kuulamylykoe                           |
| Mineralogia                         | Ohuthicanalyysi                        |
| Ennakoiva rapautumisalttius         | Ohuthicanalyysi tai veden adsorptiokoe |
| Raemuoto                            | Muotoarvomittaus                       |
| Raekokojakauma, hienoainespitoisuus | Seulonta                               |

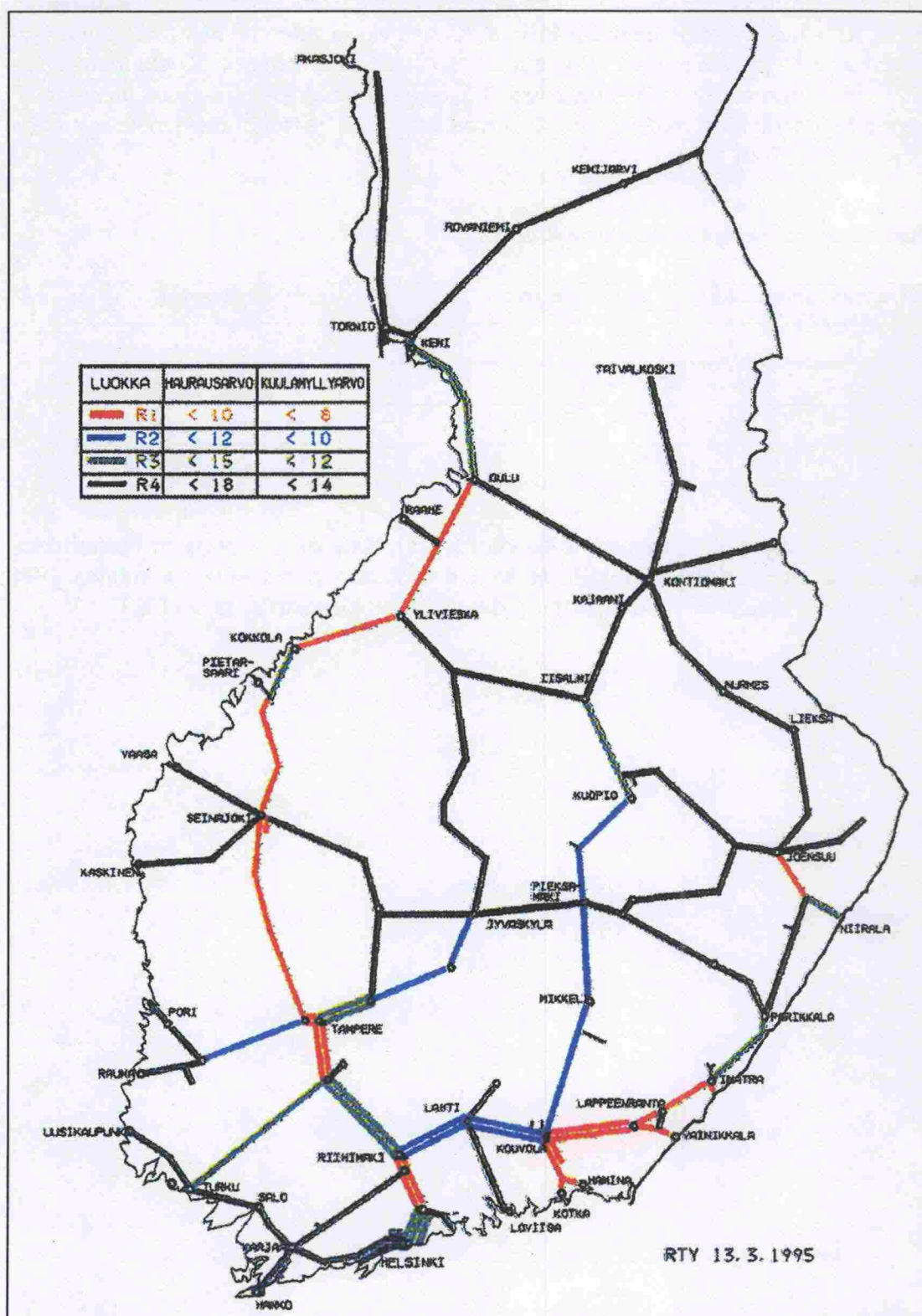
Suomessa on käytössä neliportainen raideseppelin lujuusluokitus. Haurausarvo- ja kuulamylykokeen tulokset määräävät raideseppelin lujuusluokan taulukon 3.3 mukaisesti. Luokkaa R1 edustava raideseppeli on lujinta. Kiviaineksen tulee täyttää molemmat taulukossa 3.3 esitetyt vaatimukset. Raemuoto vaikuttaa koetulokseen. Koelajitteiden ollessa hyvin kuutiomaisia ovat taulukossa 3.3 esitetyt luokkien raja-arvot pienemmät. Tarkemmin määräykset raideseppelin laatuvaatimuksista ja tutkimusmenetelmistä on esitelty lähteessä [60].

*Taulukko 3.3 Raideseppelin lujuusluokitus [60].*

| Raideseppelin lujuusluokka | Haurausarvo | Kuulamylyarvo |
|----------------------------|-------------|---------------|
| R1                         | < 10        | < 8           |
| R2                         | < 12        | < 10          |
| R3                         | < 15        | < 12          |
| R4                         | < 18        | < 14          |

Tukikerroksen käyttöikävaatimus on 40 vuotta [41]. Rataosien vuotuisten bruttoliikennemäärien ja eri seppelilujuusluokille arvioidun käyttöiän perusteella on vuonna 1995 tehty kuvan 3.2 mukainen rataosakartta raideseppelin luokkavaatimuksista [60].





Kuva 3.2 Raidesepelin laatuvaatimukset rataosittain [60].

### 3.4.3 EU:n vaikutus raideseppelin tutkimusmenetelmiin

EU-normiehdotus [37] raidesepeleksi soveltuvista kiviaineksista ja niiden testausmenetelmistä on parhaillaan lausuntokierroksella. Luonnoksessa on esitetty, että hioutuvuuden keston tutkimusmenetelmänä käytetään micro-Deval-koetta [17]. Menetelmä vastaa periaatteiltaan Suomessa nykyisin käytössä olevaa kuulamylykoetta, mutta on Suomen kallioperän lujalle kiviainekselle varsin hellävarainen [31]. Iskunkestävyyden tutkimusmenetelmäksi esitetään Los Angeles-koetta [18]. Sepelin muoto-ominaisuuksien tutkimusmenetelmiä ehdotuksessa esitetään kaksi: Flakiness index, litteysluku [15] ja Shape index, muotoarvo [16], jotka tehdään tuotetestinä raideseppelin raekoosta.

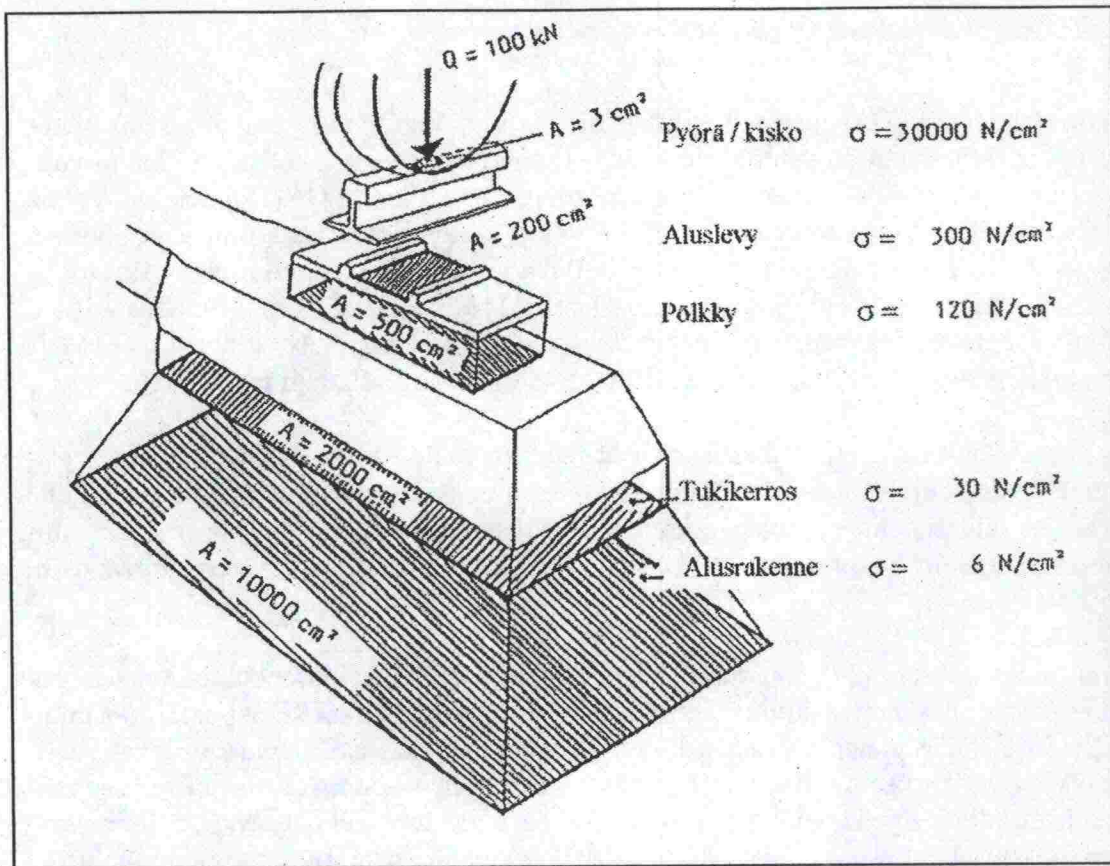
EU-normiehdotuksen [37] mukaiset kokeet tehdään tuotetestinä. Siten molempien esitettävien menetelmien suurimpana etuna Suomessa nykyisin käytössä oleviin on se, että ne tehdään raideseppelin raekoosta, jolloin ne edustavat raideseppelituotteen lujuusominaisuuksia. Tällöin haurausarvo- ja kuulamylykokeissa vaadittu tuotteen murskaus ei vääristä koetuloksia.

EU-normiehdotuksen [37] mukaisiin testeihin perustuvan raideseppeliluokituksen ongelmakohtana on alhainen lujuusvaatimustaso. Suomessa, kuten Ruotsissakin on muuhun EU:iin nähden yleispiirteissään luja kallioperä. Vastaavasti olemassa olevat vaatimuksetkin ovat korkeammalla tasolla. Suomessa nykyisin käytössä olevan raideseppeliluokituksen alinta hyväksyttävää luokkaa, R4:ää edustava kiviaines vastaa likimäärin uuden luokitusehdotuksen parasta luokkaa [31]. Ongelmallista on, että uuden luokituksen astuessa voimaan ei raideseppelin toimittajilta voida vaatia EU-normin mukaista ylintä luokkaa lujempaa sepeleä. Suomi ja Ruotsi ovat esittäneet luokkien lisäämistä asteikon yläpään.

### 3.5 Kuormituksen jakautuminen tukikerroksessa

Liikenteestä syntyvä kuormitus kohdistuu pyörän välityksellä hyvin pienelle alalle kiskossa. Kiskosta jännitys siirtyy aluslevyjen kautta ratapölkkyihin, jotka edelleen välittävät kuormituksen tukikerrokseen. Radan rakenneosassa vallitseva jännitys ei saa ylittää sen sallittua jännitystä (kuva 3.3).



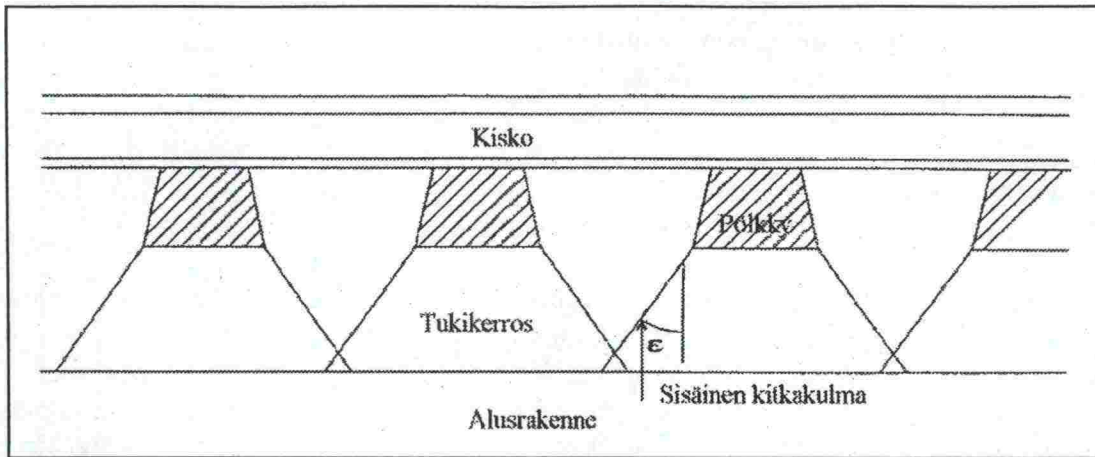


Kuva 3.3 Kuormituksen jakautuminen radassa ja jännitykset eri radan osissa [26].

Yksi tukikerroksen tehtävistä on jakaa pölkyn välittämä liikennekuorma siten, että heikkomman kuormituskestävyyden omaavaan alusrakenteeseen kohdistuvat jännitykset pysyvät sallituissa rajoissa. Liikennekuormasta alusrakenteeseen kohdistuvan jännityksen suuruuteen vaikuttaa tukikerroksen

- sisäinen kitkakulma
- raekoko
- tiiviys
- elastisuus
- kerrospaksuus [42].

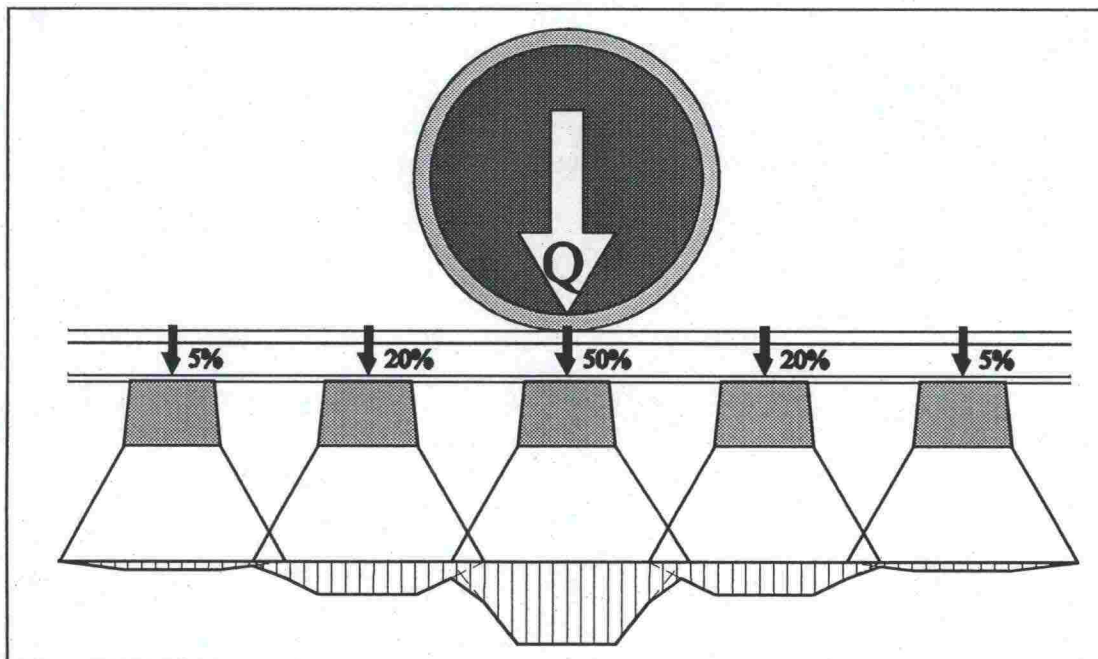
Raidesepelin sisäinen kitkakulma vastaa kulmaa, jossa jännitys jakautuu pölkyn alapinnasta lähtien (kuva 3.4). Suuri kulma on luonnollisesti edullinen. Hyvällä raidesepelillä sisäinen kitkakulma voi olla 45 astetta, mutta kuluneella, sileäpintaisella sepelillä ainoastaan 33 astetta. Keskimääräisen raidesepelin sisäinen kitkakulma on 40 astetta [27].



Kuva 3.4 Jännityksen jakautuminen tukikerroksessa [27].

Koska suurimmat jännitykset tukikerroksessakin vallitsevat pölkyn alla, on olennaisen tärkeää, että tukikerrokseen muodostuvat jännityspyramidit peittävät toisiaan (kuva 3.4). Tällöin jännitykset tukikerroksessa jakaantuvat tasaisemmin myös pölkkyjen välille. Jännityspyramidien päällekkäisyys voidaan varmistaa riittävällä kerrospaksuudella ratapölkyn alla. Pölkkyvälin ollessa 600 mm riittävä sepelikerros ratapölkyn alla on 300 mm [25], [27].

Radan elastisuus on perusedellytys kuormitusten kantamiseksi. Elastisessa radassa kuormitus jakaantuu radan pituussuunnassa usealle tukipinnalle (kuva 3.5). Jos rata ei ole elastinen, niin koko liikennekuormitus kohdistuu yhdelle tukipinnalle [47].



Kuva 3.5 Radan elastisuuden sallima kuormituksen jakautuminen usealle tukipinnalle [41].



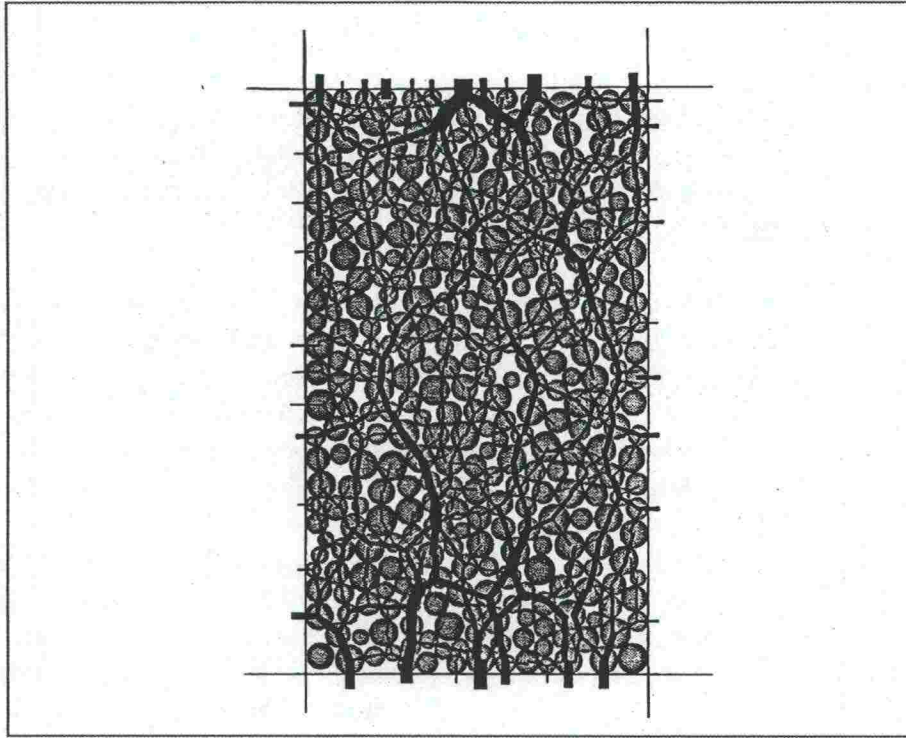
Radan elastisuus on radan rakenneosien elastisten muodonmuutosominaisuuksien ansiota. Elastisuutta lisääviä rakenneosia ovat

- kuminen välilevy kiskon ja aluslevyn välissä
- ratapölkky
- tukikerros
- alemmat rakennekerrokset [47].

Betoniratapölkyn elastiset muodonmuutosominaisuudet ovat mitättömät verrattuna puuratapölkkyyn. Betoniratapölkkyradan elastisuus onkin pääosin tukikerroksen ja alusrakenteen elastisten muodonmuutosten varassa. Voidaankin sanoa, että päätös betoniratapölkkyistä on samalla päätös puhtaasta ja hyvin kuivatetusta tukikerroksesta, sillä nämä ominaisuudet tukikerrokselta vaaditaan elastisuuden saavuttamiseksi. Puuratapölkky saattaa joissakin tilanteissa olla kokonaisuutena betonista edullisempi. Esimerkiksi Itävallassa on laajoja osuuksia, joilla on huonot maapohjaolosuhteet, eikä elastiselle betoniratapölkkyradalle ole toimintaedellytyksiä. Näillä alueilla käytetään edelleen puuratapölkkyä [47].

Raidesepelin elastisuutta voidaan arvioida kiviaineksen iskunkestävyyden perusteella. Pienen haurausarvon omaava kiviaines on sitkeää, jolloin siitä koostuvan tukikerroksen muodonmuutokset ovat elastisia suuremmilla kuormilla kuin hauraassa tukikerroksessa [42].

On huomattava, että kuvien 3.4 ja 3.5 esittämässä teoriassa jännitykset oletetaan tasan jakaantuneeksi kullakin tukikerroksen tasolla. Partikkelimekaniikkaan perustuvien simuloimintamallien, DEM (discrete element method), perusteella karkearakeisessa materiaalissa, kuten raidesepelissä, jännitykset eivät jakaudu tasaisesti. Joidenkin rakeiden välillä saattaa vallita hyvinkin suuret jännitykset, kun taas osa kontaktipinnoista on lähes kokonaan jännityksettömiä (kuva 3.6) [30]. Rakenteeseen syntyy tiettyjen kontaktipintojen kautta kulkevia jännitysketjuja, joita pitkin suurin osa kuormituksista siirtyy alusrakenteeseen huomattavasti suurempana, kuin tasaisesti jakautuneiden jännitysten teoria esittää. Tästä saattaa olla seurauksena raidesepelin tunkeutuminen alusrakenteeseen tai sepelin jauhautuminen kovaa pohjaa vasten [42].



*Kuva 3.6 Jännitysketjut karkearakeisessa materiaalissa DEM-mallinnuksen mukaan. Viivan leveys kuvaa partikkelien välillä vaikuttavan voiman suuruutta.*

Mitä tiiviimmässä tilassa tukikerros on, sitä enemmän on kontakteja yksittäisten rakeiden välillä. Kontaktien lisääntyessä yksittäiseen rakeeseen kohdistuva paine pienenee. Vastaava vaikutus on raekoolla. Mitä suurempi on raekoko, sitä vähemmän on rakeiden välisiä kontaktipintoja, ja sitä suuremmat ovat jännitysketjujen jännitykset. Toisaalta kookkaammat rakeet kestävät suurempia jännityksiä [42].



## 4. HIENOAINES TUKIKERROKSESSA

### 4.1 Hienoaineksen vaikutukset tukikerroksen toiminnalle

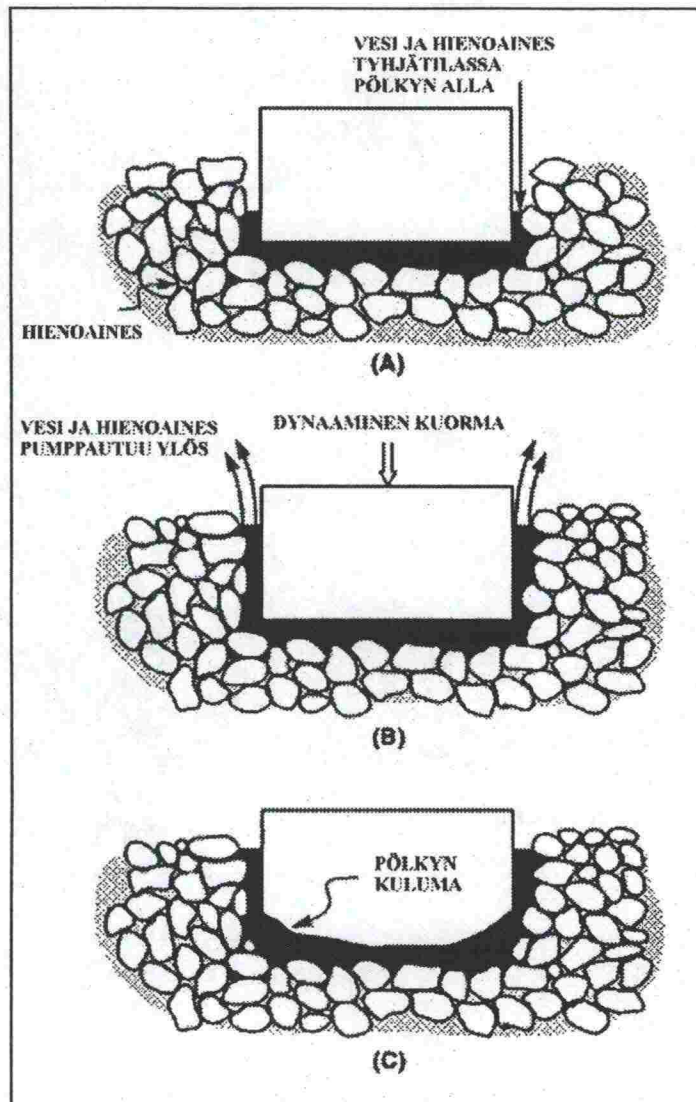
Hienoaines heikentää tukikerroksen mahdollisuuksia toteuttaa sen kappaleessa 3.2 määriteltyjä tehtäviä. Suorituskyvyn heikkeneminen riippuu hienoaineksen määrästä, raekoosta ja laadusta. Hienoainekseksi voidaan raiteen tukikerroksesta puhuttaessa lukea kaikki rakeisuusohjealueen pienintä sallittua raekokoa pienempi aines.

Rakeet, joiden koko vastaa hiekkaa tai hienoa soraa lisäävät tukikerroksen leikkauslujuutta ja jäykkyyttä. Siten tukikerroksen stabiilisuus ja vastustuskyky plastiseen muodonmuutokseen paranevat niin kauan kuin karkeat rakeet vielä muodostavat sepelin rungon. Tiivistymisen myötä tukikerroksen tyhjätila ja elastisuus kuitenkin pienenevät, minkä seurauksena tukemisen tehokkuus huononee. Vedenläpäisevyys heikkenee, mutta säilyy kuitenkin kelvollisena. [50].

Jyrkemmin tukikerroksen suorituskyky heikkenee silloin, kun sinne kerääntyy vielä hienompia, kooltaan silttiä tai savea vastaavia rakeita. Kuiva siltti- ja savilajite toimivat tiivistyneessä tukikerroksessa sementtimäisenä sideaineena muodostaen yhdessä karkeampien rakeiden kanssa kovan, betonimaisen kohdan tukikerrokseen. Kovan kohdan takia tukikerroksen elastisuus katoaa ja liikennekuormitus kohdistuu ainoastaan yhdelle tukipinnalle (ratapölkyn ja tukikerroksen kosketuspinnalle) luvussa 3.5 esitetyn mukaisesti, jolloin jauhautuminen kiihtyy tukipinnalla ja rakeiden välisillä kontaktipinnoilla tukipinnan alla. Lisäksi tukikerroksen vedenläpäisevyys pienenee oleellisesti. Vesi edesauttaa kiviaineksen murtumista jäätymis-sulamisilmiössä, kiihdyttää jauhautumista ja mahdollistaa tukikerroksen routimisen. Vesi toimii myös stabiilisuutta alentavana voiteluaineena rakeiden välillä [50].

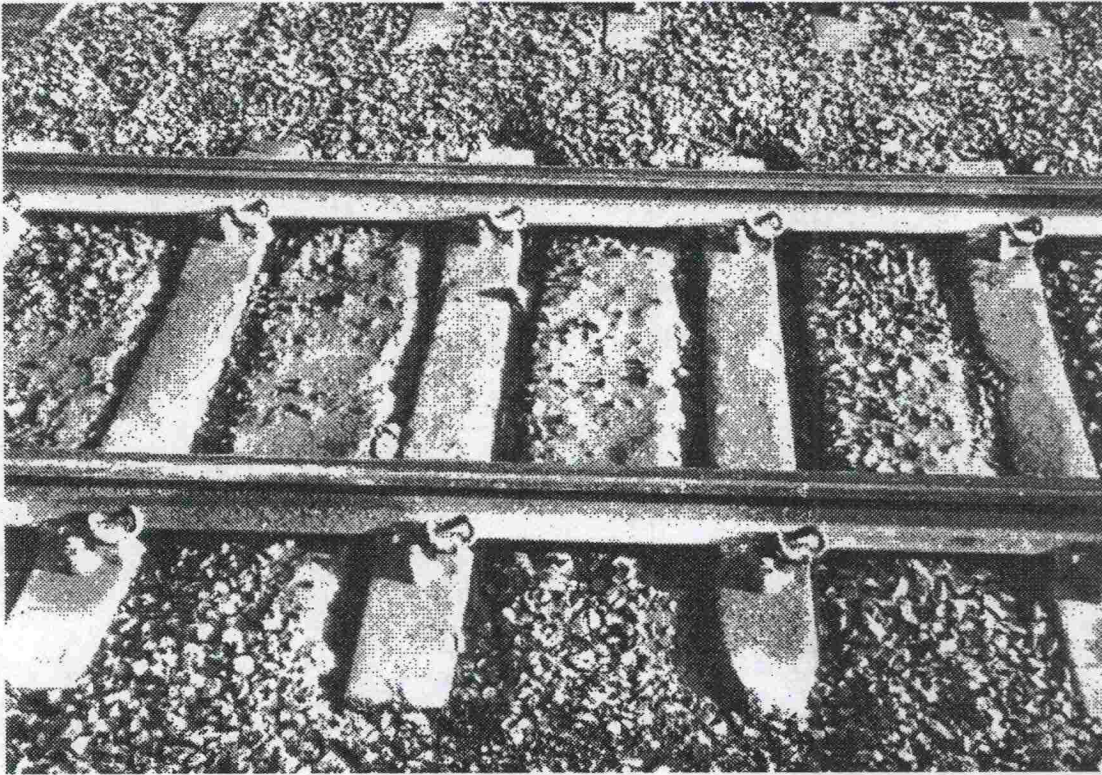
Tiivistyneessä ja heikosti vettä läpäisevässä tukikerroksessa ratapölkyn alle muodostuu kerros hienojakoista ainesta. Rankkasade aikaansaa aineksen liettymisen kaikkiin suuntiin virtaavaksi hiovaksi massaksi. Hienoaineksen kulkeutuminen tukikerroksen alempiin osiin johtaa painumaan, kun karkeammat rakeet järjestäytyvät uudelleen hienoainekselta vapautuneessa tilassa. Hiova massa liikkuu toistuvan liikennekuorman alla jauhaen tukikerrosaineksesta lisää hienoainesta. Massa hioo myös ratapölkkyä. Syntyvä hienoaines heikentää tukikerroksen vedenläpäisevyyttä edelleen ja mikäli rataa ei kunnosteta, jatkuu kuvattu tapahtumaketju kiihtyvällä vauhdilla [43], [34], [50].

Painuman seurauksena ratapölkyn alle syntyy tyhjätila, jolloin pölkystä kohdistuu tukikerrokseen terävä, kiviainesta särkevä isku junan saapuessa kohdalle. Tyhjätilan mahdollistamaa ratapölkyn liikettä pyöräkuorman alla kutsutaan pumppautumiseksi (tie pumping). Ratapölkyn pumppaamana hienoainespitoista lietettä nousee radan pinnalle kuluttaen myös betoniratapölkkyä (kuva 4.1). Pumppaava kohta voidaan havaita vaaleasta hienoaineksesta ratapölkyn sivuilla. (kuva 4.2.) [50]. Edellä selostettu prosessi voidaan yksinkertaistaa kuvan 4.3 esittämällä tavalla.

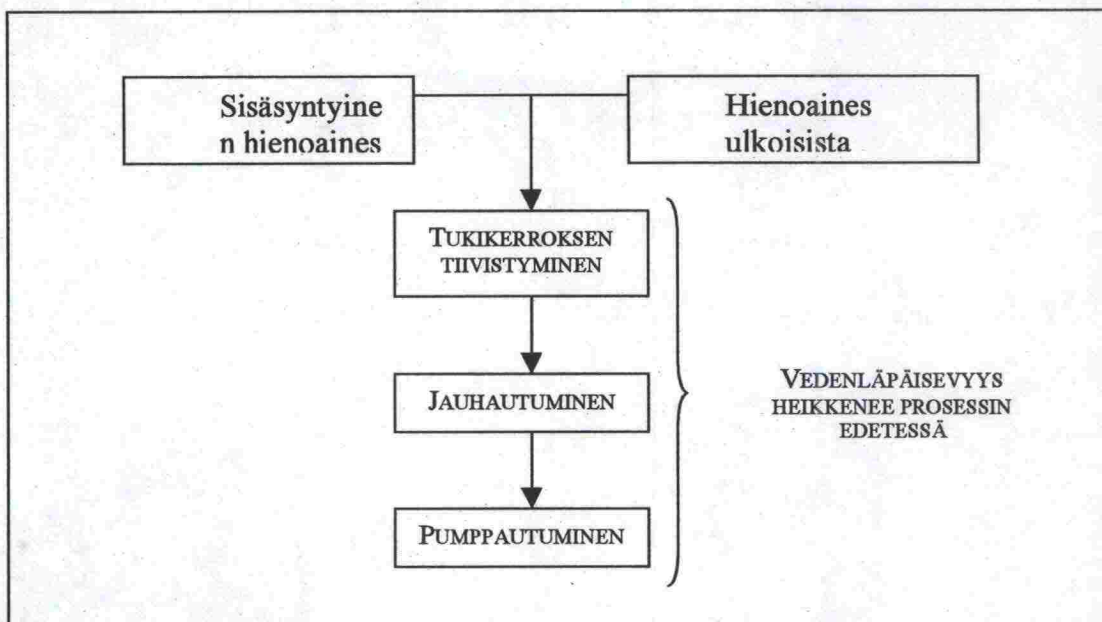


Kuva 4.1 Pumppautumisen A) syy ja B), C) seuraus [50].





Kuva 4.2 Radan pinnalle pumppautumutta hienoaainesta [50].



Kuva 4.3 Hienoaaineksen vaikutus tukikerrokselle [34].

#### 4.2 Tukikerroksen hienoaaineksen lähteet

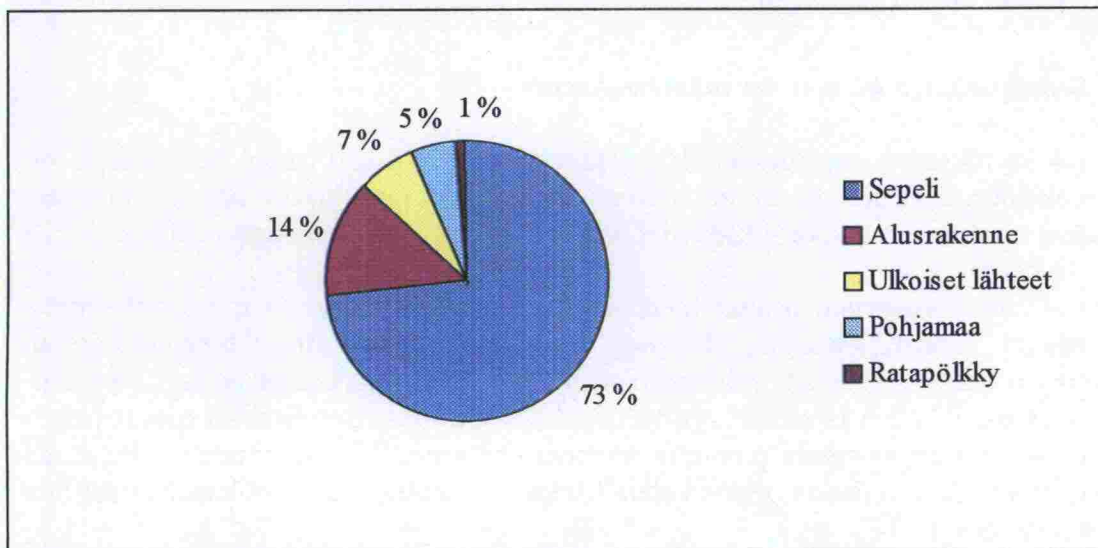
Rataan laitettaessa raidesepeli saa RHK:n vaatimusten mukaan sisältää alle 1 mm rakeita enintään 1 paino% ja alle 32 mm rakeita enintään 7 paino% [60]. Ajan myötä hienoaaineksen määrä kasvaa paljolti olosuhteista ja materiaaliominaisuuksista riippuvalla

tahdilla [50]. Hienoaineksen mahdolliset lähteet on esitetty taulukossa 4.1 [50], [19].

*Taulukko 4.1 Hienoaineksen lähteet tukikerroksessa [50].*

|  |  |
|--|--|
| <b>1. Sepelin hajoaminen:</b>                  |  |
| • käsiteltäessä                                | ➤ louhoksella                                  |
|  | ➤ kuljetuksen aikana                           |
|  | ➤ rataa laskettaessa                           |
| • partikkeleissa olevan veden jäätyessä        |  |
| • kemiallisesti rapautuen                      |  |
| • tukemisen yhteydessä                         |  |
| • liikennekuorman vaikutuksesta                | ➤ toistuva kuormitus                           |
|  | ➤ värinä                                       |
|  | ➤ syntyneen hienoaineksen hydraulinen toiminta |
| • tiivistävien koneiden vaikutuksesta          |  |
| <b>2. Ulkoiset lähteet:</b>                    |  |
| • sepeliin sekoittuneena jo rataa laitettaessa |  |
| • vaunuista pudonnut materiaali                |  |
| • tuulen kuljettamana tukikerroksen pinnalle   |  |
| <b>3. Ratapölkyn kuluminen</b>                 |  |
| <b>4. Alusrakenteen tunkeutuminen</b>          |  |
| <b>5. Pohjamaan tunkeutuminen</b>              |  |

Pohjois-Amerikassa tehdyssä tutkimuksessa [14] tarkasteltiin tukikerroksen sisältämän raekooltaan 0,075 - 9,5 mm aineksen alkuperää. Kuvasta 4.4 nähdään, kuinka pääosa hienoaineksesta oli sepeliperäistä [49], [14].



*Kuva 4.4 Tukikerroksen hienoaineksen alkuperä [49].*



Joidenkin tutkimuskohteiden raidesepeli oli kalkkikiveä, joka alittaa RHK:n lujuusvaatimukset selvästi, ja on siten alttiimpaa särkymiselle. Täten tuloksia ei voida sellaiseen soveltaa Suomen olosuhteisiin. Lisäksi Suomessa käytössä olevat väli- ja eristyskerrokset estävät täysin pohjamaan tunkeutumisen tukikerrokseen. Sen sijaan välikerroksen tunkeutuminen tukikerrokseen on mahdollista.

Saksassa ja Iso-Britanniassa on suurimmaksi tukikerroksen hienoaineslähteeksi oletettu ylhäältä päin kulkeutuminen, pääosin vaunuista putoaminen. BR:n tekemän tutkimuksen mukaan 48 % raekooltaan alle 14 mm tukikerrosaineksesta on sepeliperäistä. Loput 52 % on ylhäältä päin kulkeutunutta, pääosin vaunuista pudonnutta ainesta (taulukko 4.2) [50]. Näin suuri vaunuista pudonnut osuus johtunee runsaista hiilikuljetuksista avovauunuilla, eikä liene mahdollinen Suomessa. Kiviaineksen lujuudesta ei ole mainintaa.

*Taulukko 4.2 Tukikerroksen alle 14 mm aineksen lähteet BR:n tutkimuksen mukaan [50].*

| Lähde   | Osuus |
|---|-------|
| Sepelin joukossa rataa laitettaessa                                 | 7 %   |
| Tukemisen yhteydessä murskaautuminen                                | 20 %  |
| Jauhautuminen liikennekuorman vaikutuksesta (sis. pölkyn kuluminen) | 21 %  |
| Ulkoiset lähteet (vaunuista pudonneet ja tuulen kuljettamat)        | 52 %  |

Jos suurin hienoaineksen lähde on kulkeutuminen ylhäältä päin tai tunkeutuminen alusrakenteesta, ei sepelin laadulla ole niin suurta merkitystä tukikerroksen toiminnalle. On kuitenkin huomattava, että kaikista lähteistä peräisin oleva hienoaines kiihdyttää sepelin jauhautumista [50].

#### 4.3 Raidesepelin jauhautuminen

##### 4.3.1 Sepeliperäinen hienoaines tukikerroksessa

Yksi tukikerroksen hienoaineksen lähteistä on sepeli. Mikäli radan alusrakenne on asianmukainen, eikä hienoaineksen kulkeutumista myöskään ylhäältä päin merkittävässä määrin tapahdu, on tukikerroksen hienoaines kokonaan raidesepelistä peräisin.

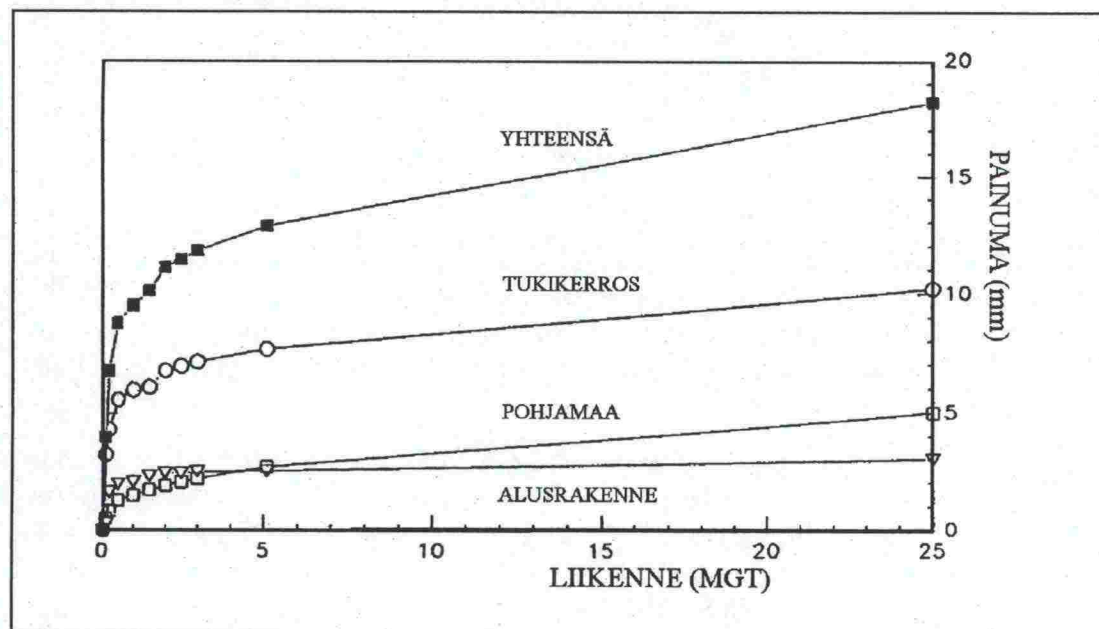
Jo rataa laitettaessa sepeli sisältää hienoainesta. Hienoainesta syntyy myös aina sepeliä käsiteltäessä, kuormauksen ja purkamisen yhteydessä. Ajan mittaan liikennekuorman vaikutuksen alaisena sepelistä lohkeaa pienempiä rakeita partikkelien välisissä kontakteissa sekä partikkelien ja ratapölkyn välisissä kontakteissa. Sepelirakeet hiovat jauhmaista hienoainesta toistensa pinnoilta toistuvan kuormituksen liikuttamina. Puhutaan raidesepelin jauhautumisesta. Myös kemiallisella rapautumisella on vaikutusta tiettyihin sepelikiviaineisiin [34].

#### 4.3.2 Jauhautumisen yhteys raiteen epätasaisuuteen

Koska ratapenkereen alapuolinen pohjamaa sekä pengertäyte ovat uusia ratoja lukuunottamatta olleet jo pitkään liikenne- ja pengerkuormituksen alaisena, on niiden painuminen yleensä vähäistä ja hidasta. Silloinkin, kun painumat ovat suuria pienenevät ne aikaa myöten, kun kunnostustoimenpiteenä lisättävä sepeli kasvattaa tukikerrospaksuutta ja tasaa pohjamaahan kohdistuvia jännityksiä. Eristys- ja välikerrosten painumat ovat vanhassa radassa huomattavan pieniä [50].

Syynä raiteen suhteellisen nopeasti syntyviin korkeuspoikkeamiin onkin yleensä tukikerroksen raidesepelin palautumattomat muodonmuutokset, raidesepelin jauhautuminen ja siitä seuraava tiivistyminen. Näin on varsinkin silloin, kun radan rakennekerrokset ovat asianmukaiset, ja kun poikkeamat syntyvät pohjamaan painumaan nähden lyhyellä aikavälillä [50]. Stabiileissa olosuhteissa pohjamaassa ja tukikerroksessa yhteensä tapahtuvien painumien aiheuttamat raidevirheet voidaan korjata tietyin, n. viiden vuoden välein toistuvalla tukemisella [11].

Kuvassa 4.5 on esitetty eri rakennekerrosten painumien vaikutus uuden radan kokonaispainumaan liikennemäärän kasvaessa pohjoisamerikkalaisen tutkimuksen mukaan. 25 miljoonan bruttotonnin liikennekuormituksen jälkeen yli puolet kokonaispainumasta muodostuu tukikerroksen painumasta. On huomattava, että koska rata on uusi, eivät alemmat rakennekerrokset ole vielä olleet liikennekuormituksen alaisena. Myöhemmin tapahtuvan tukemisen jälkeen tukikerroksen painuman osuus kokonaispainumasta tulee korostumaan, sillä pohjamaan painuminen pysyy saman suuruisena ja alusrakenteen painuminen hidastuu. Tukemisen yhteydessä löyhtynyt tukikerros sen sijaan tiivistyy eli painuu liikennekuorman vaikutuksesta [50].



Kuva 4.5 Rakennekerrosten osuus kokonaispainumasta liikennemäärällä 0-25 miljoonaa bruttotonnia [50].

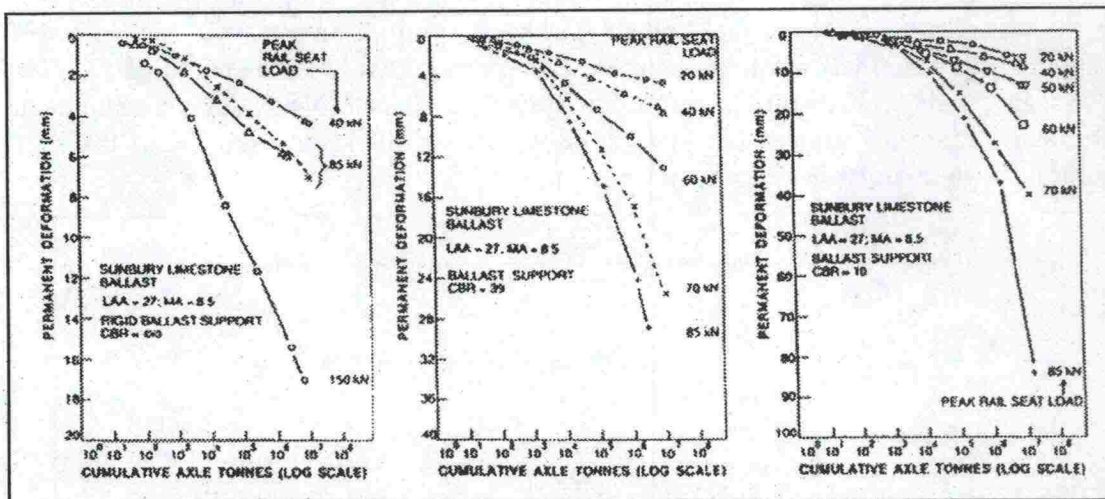


#### 4.3.3 Kumulatiivisen liikennemäärän vaikutus jauhautumiseen

Hienoaineksen määrä tukikerroksessa, ja siten myös jauhautuminen oletetaan yleisesti suoraan verrannolliseksi kumulatiiviseen bruttolikennemäärään [29], [7], [57]. Tässä on selvä ristiriita jauhautumisteorian kanssa, jonka mukaan jauhautuminen kiihtyy hienoainesmäärän kasvaessa, mutta jauhautumista arvioitaessa tällainen oletus yleensä tehdään. Jauhautumisprosessin uskotaan todellisuudessa tapahtuvan eksponentiaalisesti kasvavalla nopeudella [5], [50], mutta lineaarisesta poikkeavia tarkempia arvioita ei ole esitetty.

#### 4.3.4 Akselipainon vaikutus jauhautumiseen

Raymond ja Bathurst [46] tutkivat laboratoriossa kalkkikivisepelin pysyviä muodonmuutoksia eri suuruisilla akselipainoa kuvaavilla kuormituksilla. Kuormitukset vaihtelivat välillä 20 - 150 kN. Tietyllä sepelin alustan jäykkyydellä ja tietyllä kumulatiivisella kuormitusmäärällä oli suuremman akselipainon aiheuttama pysyvä muodonmuutos selvästi suurempi kuin pienemmän akselipainon aiheuttama pysyvä muodonmuutos, kuten kuvasta 4.6 voidaan todeta. CBR-luku kuvassa kertoo sepelin alustan jäykkyyden. Jos CBR on ääretön sanotaan sen vastaavan kalliroleikkauksessa tai tunnelissa olevaa jäykkyyttä tukikerroksen alla. Luku 10 vastaa savista- tai siltistä pohjamaata.



Kuva 4.6 Eri suuruisten akselipainoa simuloivien syklisen kuormituksen synnyttämät pysyvät painumat sepelissä jäykkyydeltään erilaisilla alustoilla [46].

Toisessa laboratoriokokeessa [23] tutkittiin miljoonan kuormitus syklin jälkeen kahden erisuuruisen kuorman, 160 kN:n ja 220 kN:n synnyttämiä hienoainesmääriä. Kuormituslisäys 160 :sta 220 kN:iin vastaa 39 % kuormituslisäystä. 220 kN:n kuormituksessa syntyneen alle 9,5 mm aineksen määrä oli 160 % 160 kN:n kuormituksessa syntyneestä. Raekooltaan yli 9,5 mm, kuitenkin jauhautunutta ainesta, syntyi 220 kN kuormituksessa 670 % 160 kN:n kuormitukseen verrattuna. On syytä huomata, että myös kumulatiivinen kuormitus on 220 kN:n kuormituksessa 39 % suurempi syklien lukumäärän ollessa samat.

Laajin akselikuormien vaikutusta sepelin jauhautumiseen käsittelevä tutkimus [55] on tehty AAR:n testiradoilla. Tutkimus on osa FAST/HAL:n laajaa suurien akselikuormien käsittelevää projektia. Siinä on testattu mm. 300 kN ja 350 kN akselipainon vaikutusta



neljään kivilajiin; graniittiin, diabaasiin, dolomiittiin ja kalkkikiveen todellisissa olosuhteissa. Kummallakin akselikuormituksella on ajettu omalla testiradallaan, joiden tukikerroksista on otettu näytteitä tiettyjen kumulatiivisten liikennemäärien jälkeen. Tutkimuksen tulos on varsin yksiselitteinen. Vielä 750 MGT:n jälkeenkin ero 300 ja 350 kN:n akselikuorman synnyttämässä hienoaineksen määrässä oli hyvin pieni. Lujempien kivilajien, diabaasin ja graniitin kohdalla eroa ei ollut lainkaan. Heikon kalkkikivenkin osalta ero oli pieni.

Suunniteltaessa siirtymistä 300 kN:n akselipainoihin Pohjois-Ruotsin Malmabanalla Banverket tutki akselikuorman korottamisen vaikutusta sepeliin eri tavoin. Laboratorio-kokeessa todettiin 2 miljoonan kuormitusyökin aikaansaama hyvälaatuisen kiviaineksen rakeisuuden muutos 150 kPa:n ja 500 kPa:n kuormituksella likipitään samaksi. Toisessa laboratorio-kokeessa tutkittiin raideseppelin käyttäytymistä toistuvassa kuormituksessa laboratorioon rakennetulla betonisillalla. Myöskään tässä kokeessa ei merkittävää eroa erisuuruisten kuormitusten synnyttämässä hienoainesmäärässä hyvällä raideseppelillä havaittu [2].

Malmabanalla mitattiin myös muodonmuutoksia todellisessa tilanteessa eri akselikuormilla. Taulukossa 4.3 vertaillaan 250 ja 300 kN:n akselipainojen synnyttämiä muodonmuutoksia 0,6 metrin syvyydellä eri nopeuksilla [2].

*Taulukko 4.3 Muodonmuutos 0,6 metrin syvyydellä 25 ja 30 tonnin akselien alla sekä prosentuaalinen kasvu 25 tonnista 30 tonniin siirryttäessä [2].*

| Nopeus<br>(km/h) | Akselipaino 25 t<br>(mm) | Akselipaino 30 t<br>(mm) | Prosentuaalinen kasvu (%) |
|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 40               | 0,42                     | 0,50                     | 19,1                      |
| 60               | 0,44                     | 0,51                     | 15,9                      |
| 70               | 0,40                     | 0,47                     | 17,5                      |

Yhteenvedona AAR:n ja Banverketin tutkimuksista voidaan todeta, että raideseppelin jauhautumisen osalta ei ole estettä akselikuorman korottamisesta 250 kN:sta 300 kN:iin ja edelleen 350 kN:iin silloin, kun kiviaines on suhteellisen lujaa, kuten meillä Suomessa on. Tämä pätee tietysti sillä edellytyksellä, että kokonaisliikennemäärä ei kasva. Jos kuljetettava tavaramäärä pysyy samana, voidaan teoriassa ajatella kokonaisliikennemäärän jopa pienenevän sallitun akselikuorman kasvaessa, koska kuljetuksiin tarvittavien vaunujen määrä ja siten niistä syntyvä kuorma pienenee.

#### **4.3.5 Raideseppelin radassaoloajan vaikutus jauhautumiseen**

Raideseppelin radassaoloajan ei ole todettu vaikuttavan tukikerroksen hienoainespitoisuuteen eikä siten myöskään jauhautumiseen paitsi rapautumisalttiiden kivilajien kohdalla. Korrelaatio bruttolikennemäärään on todettu merkittävämmäksi. [34], [57], [8].

#### **4.3.6 Kiviaineksen laadun vaikutus jauhautumiseen**

On selvää, että samoissa olosuhteissa kova ja sitkeä kivi jauhautuu vähemmän, kuin pehmeä ja hauras. Muut jauhautumiseen vaikuttavat kiviainesominaisuudet ovat rapautumisalttius ja rakeen muoto. Pitkulaiset ja litteät rakeet murtuvat kuutiomaisia pienemmillä jännityksillä. Rakeiden koko määrää luonnollisesti niille sallitun jännityksen



samoin kuin huokostila säätelee veden ja hienoaineksen liikkeitä, joten myös raekokojakauma vaikuttaa jauhautumiseen.

Gaskinin ja Raymondin tutkimuksen [24] tuloksena havaittiin selvä yhteys kunnossapitotarpeen ja kiviaineksen lujuuden välillä samoin kuin hienoainespitoisuuden ja kiviaineksen lujuuden välillä. Klassenin ja muiden tutkimuksessa [29] todettiin lineaariseksi oletettu yhteys kiviaineksen lujuuden ja kestoian välillä (vrt. 5.3.2). Tällöin on selvää yhteys myös lujuuden ja jauhautumisen välillä.

Uusi-Luomalahden tutkimuksessa [57] tarkasteltiin lujuuskoetuloksista eri tavoin muodostettujen lujuutta kuvaavien indeksien yhteyttä tukikerroksen hienoainespitoisuuteen. Tarkasteltujen rataosuuksien vähyydestä ja tehdyistä karkeista oletuksista huolimatta voitiin raidesepelin lujuuden todeta vaikuttavan oleellisesti hienoaineksen määrään ja siten vääjäämättä jauhautumisen suuruuteen.

#### **4.3.7 Ratapölkkyateriaalin vaikutus jauhautumiseen**

CN on tutkinut tukikerroksen tilaa kerrospaksuuden ja raidesepelin lujuuden osalta muuttumattomalla rataosuudella, jolla on sekä betoni- että puuratapölkkyjä. Tuloksista oli selvästi nähtävissä, että betoniratapölkkyraiteessa jauhautuminen oli puuratapölkkyraidetta suurempaa. Vastaavasti tukikerroksen osalta hyväkuntoisen puuratapölkkyraiteen betoniratapölkkyraiteeksi muuttamisen jälkeen on hienoaineksen määrä kasvanut ongelmatasolle 3-5 vuodessa [6].

Sepeliin betoniratapölkystä siirtyvä dynaaminen kuormitus on 16 % suurempi, kuin puuratapölkkyistä. Tämä johtuu ratapölkkyjen paino- ja elastisuuseroista. Puuratapölkyn alapinnalla sepelirakeet tunkeutuvat ratapölkkyyn, jolloin kuormitusta välittävä pinta-ala ratapölkyn ja tukikerroksen välillä kasvaa ja yksittäisiin rakeisiin kohdistuvat jännitykset pienenevät. Sepelin tunkeutuminen betoniratapölkkyyn ei ole mahdollista, mistä seurauksena on suuremmat jännitykset kuormitusta välittävillä kontaktipinnoilla ja edelleen koko tukikerroksessa. Jos jännitys ylittää sepelirakeen lujuuden, murtuu rae osiin. Näistä syistä betoniratapölkkyraiteessa jauhautuminen on selvästi suurempaa kuin puuratapölkkyraiteessa [34].

On kuitenkin muistettava, että betoniratapölkkyllä on muita etuja puuratapölkkyyn nähden, kuten sen tarjoama noin 1,5-kertainen sivuttaisvastus [54], pidempi kestoikä sekä kiskon kiinnittämiseen liittyvät näkökohdat.

#### **4.3.8 Kiskotyypin vaikutus jauhautumiseen**

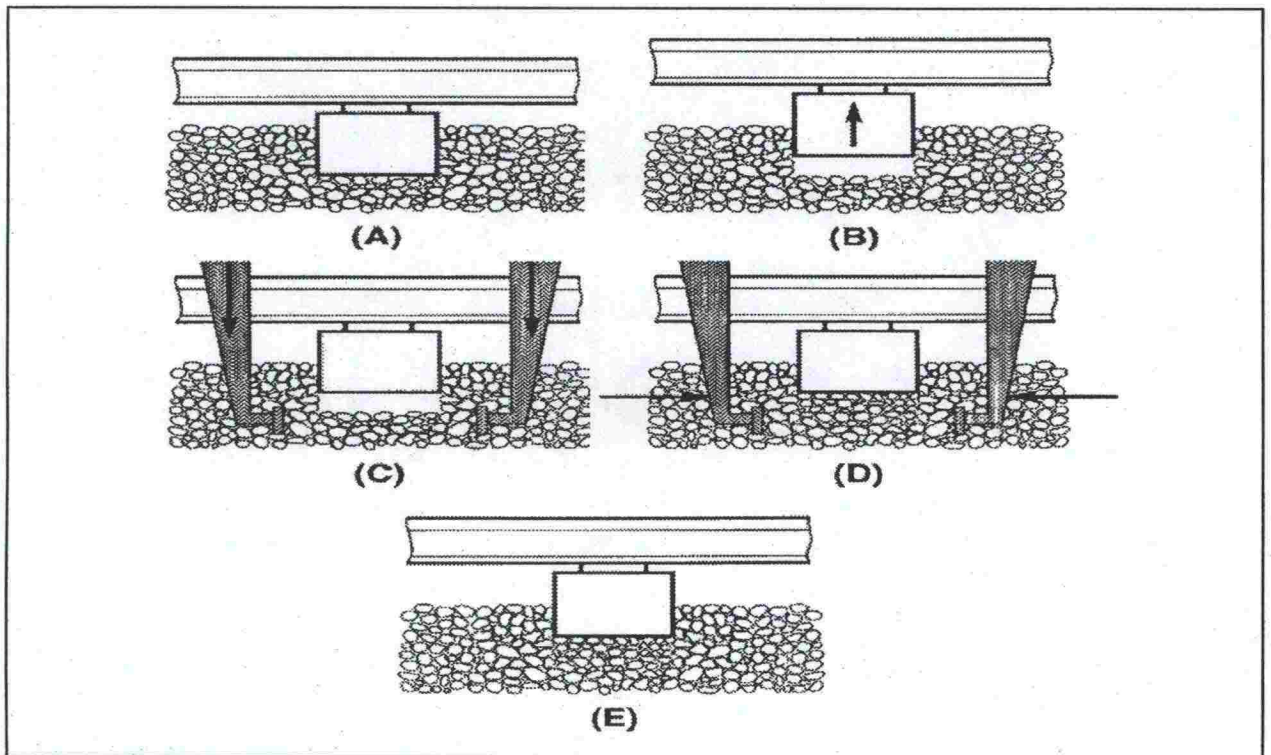
Jäykällä kiskolla pyöräkuorma jakautuu useammalle pölkylle. Tällöin kuormitus jakautuu laajemmalle alueelle myös tukikerroksessa. BR:n tutkimuksen mukaan siirtyminen kiskopainosta 56 kg/m 65:een kg/m vähentää painumia 20 %. Tämä johtuu tukikerroksen jännitysten pienenemisestä [62]. Dynaaminen kuorma on suuri raiteen epäjatkuvuuskohdissa, kuten sillan päissä, eristys- ja muissa jatkoksissa sekä huonojen hitsausliitosten kohdilla. Nämä kohdat ovatkin erityisen hankalia raidesepelin jauhautumisen kannalta [6].

#### 4.3.9 Raidegeometrian ja kuljetuskaluston kunnon vaikutus jauhautumiseen

Raidevirheet lisäävät dynaamista kuormitusta. Raiteen epätasaisuus saattaa aiheuttaa 1,8 kertaa staattisen kuorman suuruisen dynaamisen kuormituksen tukikerrokseen [46]. Täten jauhautumisesta aiheutuva raidevirhe suurentaa sepeliin kohdistuvaa kuormitusta ja näin ollen kiihdyttää jauhautumista edelleen. Myös kuljetuskaluston kunnon merkitys on huomattava, sillä kuluneista vaunun pyöristä tukikerrokseen kohdistuva dynaaminen kuorma voi olla 100 - 200 % suurempi uusiin pyöriin nähden [48].

##### 4.3.10 Kunnossapidon vaikutus jauhautumiseen

Radan rakennekerrosten painumisen johdosta raiteeseen syntyy siirtymiä, joiden ylittäessä kunnossapitotasosta riippuvan rajan on tukikerrokseen kohdistettava kunnossapitoimenpiteitä. Usein ainoa kysymykseen tuleva toimenpide on raiteen tukeminen. Tukeminen tapahtuu raidetta nostamalla ja työntämällä koneellisesti sepeliä ratapölkyn alle siten, että raiteelle saavutetaan haluttu asema ja asento. Tukemisen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.7. Ensimmäisessä vaiheessa raidetta nostetaan halutulle tasolle ja tukemishakut työnnetään tukikerrokseen. Sen jälkeen hakkuja puristetaan, jolloin sepeliä työntyy ratapölkyn alle. Puristusaika ja -paine määräytyvät tukikerroksen perusteella [1].



Kuva 4.7 Tukemisen periaate [50].

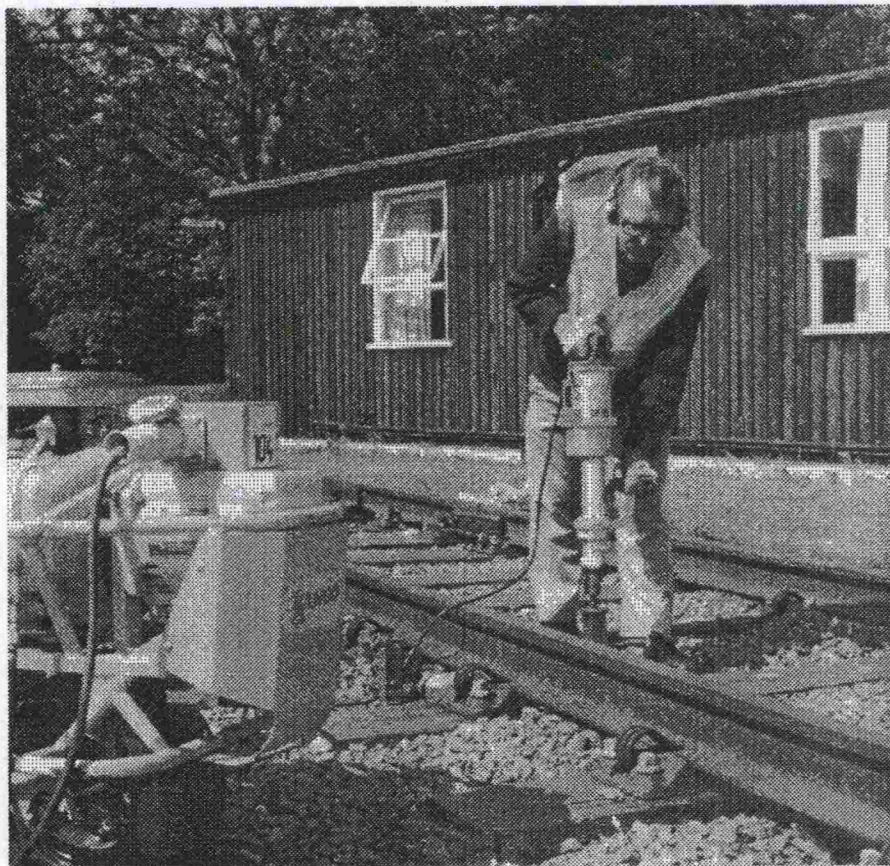


Pidempien matkojen tukemiseen käytetään yleensä erityistä kiskoilla kulkevaa linjatukemiskonetta. Vaihteentukemiskonetta käytetään vaihteiden ja tiettyjen erikoispaikkojen tukemiseen [1]. Lyhyitä painumakohtia, kuten sillan päitä ja kiskon jatkoskohtia samoin kuin hankalasti tuettavia kohtia vaihteessa, tuetaan useimmiten käsin käytettävällä tukemiskoneella tunkin avustuksella.

Tukemiskoneen hakut rikkovat sepeliä työntyessään tukikerrokseen. BR:n tutkimuksessa saatiin tukemisen yhteydessä särkyneen hienoaineksen osuudeksi 20 % kaikesta tukikerroksen hienoaineksesta (kts. taulukko 4.2). Laskentaperusteena käytettiin 7 puristuskertaa tukikerroksen uusimisen yhteydessä ja lisäksi 1 puristuskerta vuodessa 15 vuoden ajan. Kiviaineksen lujuudesta ei ollut mainintaa [50].

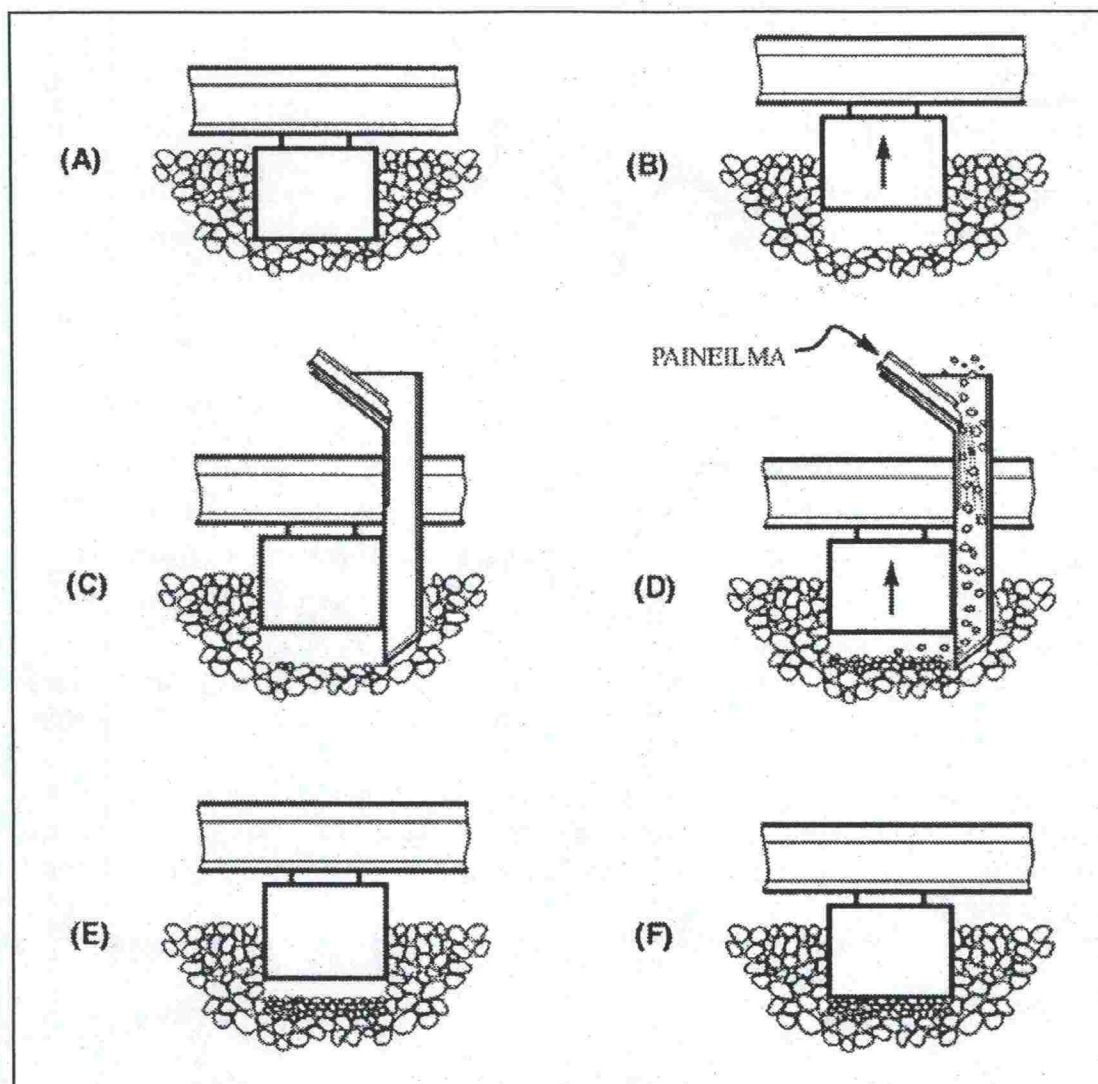
Toisessa BR:n tutkimuksessa [3] todettiin 20 peräkkäisen puristuksen jälkeen 15-45 % alenema 38-51 mm raekoossa. Alle 13 mm raekoon osuus oli vastaavasti lisääntynyt 1 %:sta 5 %:iin. Ratalaboratoriokokeessa [62] havaittiin jokaisen puristuskerran synnyttävän 2-4 kg raekooltaan alle 14 mm ainesta, jonka lisäksi myös suurempaa murtunutta ainesta.

Koska BR:n tutkimuksista kävi ilmi tukemishakkujen suuri sepeliä murtava vaikutus, alettiin BR:ssä kehittää vaihtoehtoista raiteentukemismenetelmää. "Stoneblower" on sepelille hellävarainen BR:n kehittämä kunnossapitoratkaisu. Stoneblower-tyyppisiä laitteita on sekä käsikäyttöisiä (kuva 4.8), että kiskoilla kulkevia koneita. Menetelmässä raidetta nostetaan, jonka jälkeen täydennyssepeliä työnnetään paineilman avulla rata-pölkyn alle (kuva 4.9) [50].



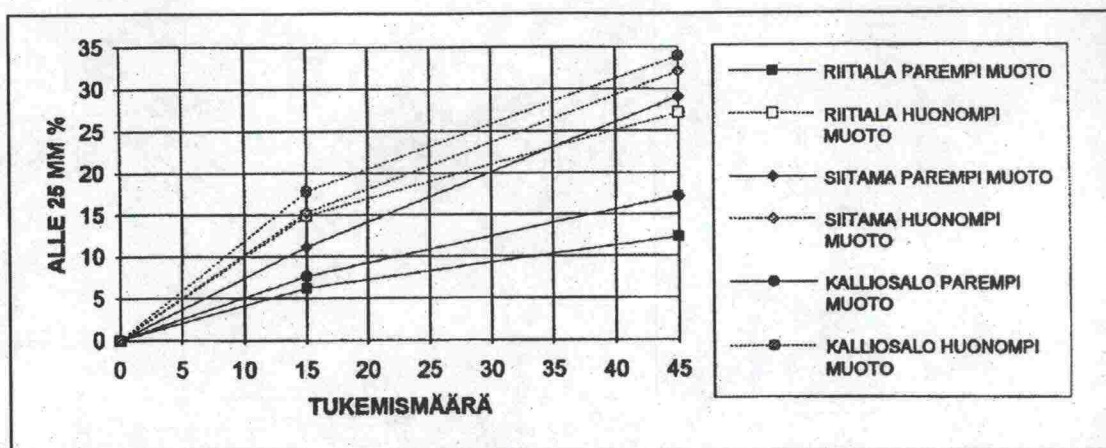
Kuva 4.8 Käsikäyttöinen Stoneblower [50].





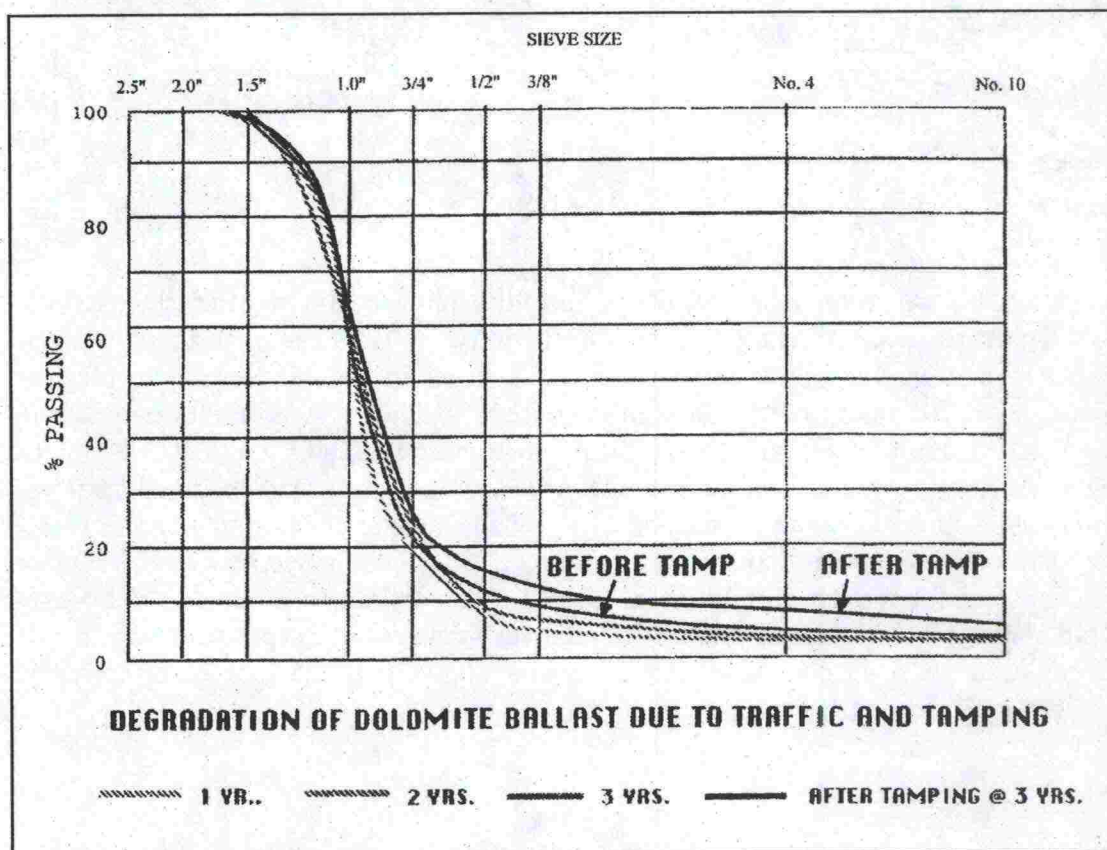
Kuva 4.9 Stoneblowerin toimintaperiaate [50].

Suomessa tehdyssä tutkimuksessa [57] tarkasteltiin raidesepelin murtumista tukemis-työssä. Tukikerrokseen oli sijoitettu sepelillä täytetty, n. 1200 raitta sisältävä metalli-laatikosto, jonka avulla tutkittava sepele ei päässyt sekoittumaan ympäröivän tukiker-roksen kanssa. Tutkimuksen nojalla jauhautumiseen vaikuttaa sekä sepelin muotoarvo, että lujuus. Raemuoto todettiin jopa lujuutta tärkeämmäksi tekijäksi, sillä kuutiomaisten rakeiden havaittiin rikkoontuvan lujuudeltaan vastaavia pitkulaisia rakeita selvästi vä-hemmän. Sepelin rikkoontumisen havaittiin pienenevän puristuskertojen lisääntyessä, mikä johtuu rakeiden muotoarvon paranemisesta ja sepelin tiivistymisestä. Tiiviissä tukikerroksessa tukeminen on tehotonta. Lisäksi todettiin litteiden rakeiden rikkoontu-van pitkulaisiakin helpommin, jolloin litteiden rakeiden osuutta sepelissä saattaisi olla syytä rajoittaa. 15 ja 45 puristuskerran jälkeen syntyneen alle 25 mm aineksen määrä eri kiviaineksilla on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10 15 ja 45 tukemiskerran jälkeen syntynyt alle 25 mm aineksen määrä eri kivilajeilla ja muotoarvoilla [57].

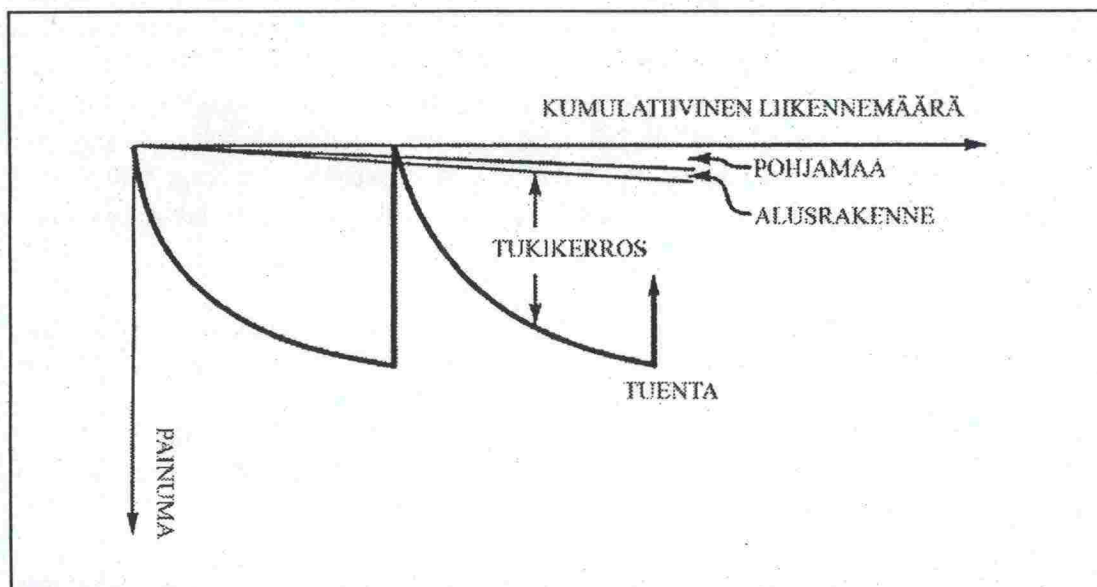
Myös AAR on tutkinut tukemisen vaikutusta raidesepeliin testiradallaan Santa Fe:ssä. Yksittäinen puristuskerta kolme vuotta vanhaan dolomiittiseen sepeliin lisäsi läpäisyprosentin 4,75 mm seulalla 5 %:stä 8,5 %:een (kuva 4.11). Kuvassa näkyy rakeisuuskäyrä myös yhden ja kahden vuoden jälkeen. Kahdessa lujemmasta aineksestä koostuvassa sepelissä, kvarsiitissa ja kuonassa ei merkittäviä muutoksia rakeisuudessa havaittu. Voidaankin todeta, että tukemisen jauhautumista lisäävä vaikutus korostuu heikoilla kiviaineksilla [9].



Kuva 4.11 Rakeisuuskäyrä ennen ja jälkeen tukemisen [9].



Raidesepelin särkymisen lisäksi toinen merkittävä tukemisen häiritsevä tekijä on sen tukikerrosta löyhdyttävä vaikutus, mistä seurauksena on huomattavat painumat tukikerroksessa heti tukemisen jälkeen. (kuva 4.12) [50]. Myös sivuttaisvastus on tukemisen löyhdyttämällä tukikerroksella huomattavasti pienempi kuin liikennekuormituksen tiivistämällä tukikerroksella [54].



Kuva 4.12 Tukikerroksen suuri painuma tukemistyön jälkeen [50].

Yhteenvedona voidaan todeta tukemisen olevan erittäin merkittävä tekijä raidesepelin jauhautumisessa. Tarkasteltaessa asiaa toiselta kannalta on muistettava, että mikäli rataa ei tueta, heikentyy raidegeometria edelleen. Tästä on seurauksena dynaamisen kuormituksen huomattava kasvu junan pyörän iskiessä epätasaiseen kiskoon ja siten jauhautumisen lisääntyminen. Näin ollen tukeminen vaikuttaa myös jauhautumista ehkäisevästi.

Kun hienoaineksen määrä tukikerroksessa kasvaa tiettyyn raja-arvoon, ei tukemisella enää saavuteta tyydyttävää tasoa raiteen geometriassa. Tällöin tukikerros on puhdistettava edellisessä kohdassa esitetyn mukaisesti. Mikäli puhdistaminen tehdään ajoissa, saattaa karkearakeista, rataa palautettavissa olevaa ainesta olla jäljellä runsaastikin ja poistetun hienoaineksen korvaavan täydennyssepin määrä jää pienemmäksi. Huonolaatuisen sepelin rataa palauttamista on kuitenkin syytä harkita (ks. 8.3).

#### 4.4 Hienoainespitoisuuden arviointi

##### 4.4.1 Näytteenotto manuaalisesti

RHK:n käyttämä hienoainespitoisuuden arviointimenetelmä perustuu radasta otettujen näytteiden analysointiin. Näyte otetaan tukikerroksen laadun tutkimusohjeen [40] mukaisesti. Näyte seulotaan ja seulontatuloksista lasketaan yhteen 1, 8 ja 25 mm:n läpäisyprosentit. Saatu summa on näytteen rakeisuusluku.

Manuaalisessa tukikerroksenäytteenotossa on kuitenkin ongelmia. Koska näytteenotto suoritetaan pölkyn alapinnan tason alapuolelta, on kaivutyö suoritettava äärimmäisen varovaisesti, jotta hienoaines ei pääse varisemaan ylemmistä kerroksista näytteenottotä-

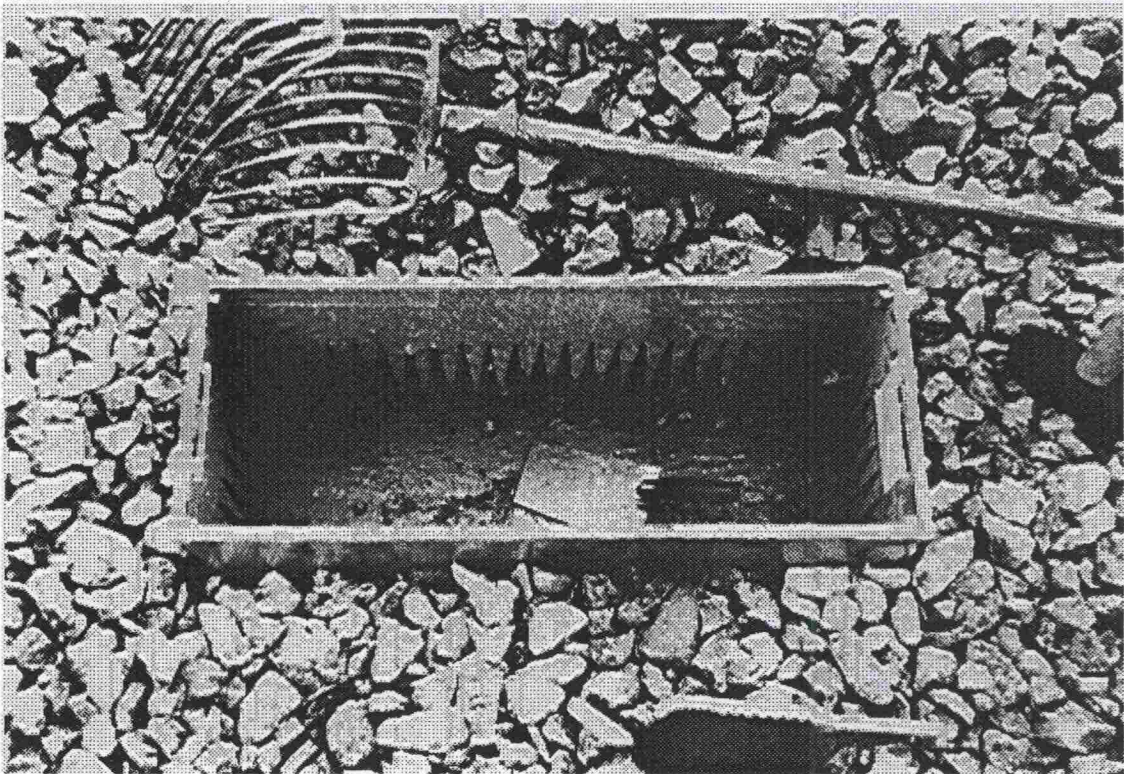


solle tai vastaavasti näytteenottotasolta alaspäin. Lisäksi hienoainesta sisältävä tukikerros on usein niin kovaa, että näytteen irrottamisessa käsin on vaikeuksia.

EU-normiluonnoksessa [37] esitetään näytteenotossa käytettäväksi metallista korkeudeltaan 300 mm (550 mm x 320 mm) kehikkoa (kuva 4.13). Tukikerros tyhjenetään ensin ratapölkyn alapintaan saakka, jonka jälkeen yhtä ratapölkkyä siirretään, jotta näyte saadaan osittain myös ratapölkyn alta. Tämän jälkeen kehikkoa lyödään tai painetaan tukikerrokseen vaiheittain alusrakenteen yläpintaan saakka estämään kuopan reunojen luhistuminen. Lyöntien välillä kerätään näytettä kehyksen sisältä sen tunkeutuvuuden parantamiseksi. Kehikko ei kuitenkaan estä hienoaineksen valumista näytteenottosyvyyteen pystysuunnassa. Siksi analysoitavaksi tuleekin ottaa kaikki kehyksen sisään jäävä materiaali [21].

Ongelmalliseksi tilanne muodostuu, kun tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaa ei pystytä määrittelemään, tai jos tukikerrospaksuus vaihtelee. Tällöin näytteeseen saattaa tulla mukaan tulosta vääristävää alusrakennemateriaalia tai vastaavasti alin osa tukikerroksesta jäädä pois. Lisäksi kehyksen työntäminen tukikerrokseen saattaa olla ongelmallista. Ratapölkyn siirto vaikuttaa tarpeettomalta, koska näyte voitaisiin yhtä hyvin ottaa ratapölkkyjen päiden välistä.

Tukikerroksen puhdistustarvetta määritettäessä näytteitä otetaan useimmissa maissa varsin tihein välimatkoin. Esimerkiksi DB ja BR ottavat 10-12 näytettä kilometriä kohden [21]. RHK:n käyttämä 1 näyte/km tai 1 näyte/ 2km on tästä vain 5-10 %.



Kuva 4.13 EU-normiehdotuksen mukainen kehikko tukikerrosnäytteenottoa varten [21].



#### 4.4.2 Näytteenotto mekaanisesti

Vaihtoehtoinen menetelmä manuaaliselle näytteenotolle on mekaaninen, sydännäytekairaukseen verrattava poralla tehtävä näytteenotto. Tällainen menetelmä on käytössä monissa rautatieyhtiöissä, mm. SJ, DB, MAV, NS, SBB, SNCF [21].

Ruotsissa on näytteenotto-ongelma ratkaistu erityisen näytteenottoporauskaluston avulla. Laite on ollut käytössä vuodesta 1996 ja tunnetaan nimellä Ballastprovtagare-MUM 9601 (kuva 4.14). Kyseessä on vanhaan tukemiskoneeseen asennettu sydännäytteenottava pora. Poran halkaisija on 200 mm ja suurin näytteenottosyvyys 1,40 m. Näyte otetaan yleensä raiteen keskeltä, mutta se voidaan ottaa myös korkeintaan 1,3 m kiskon ulkopuolelta [35], [53].

MUM-9601:llä saadaan tukikerroksesta ja haluttaessa väli- ja eristyskerroksista näyte, jonka eri kerrokset eivät pääse sekoittumaan. Poran annetaan kairautua halutulle tasolle, jonka jälkeen pora sisään jääneine näytteineen nostetaan ylös analysoitavaksi. Poran varressa on irrotettava kuori (kuva 4.14), jonka avulla näytteen eri kerroksia voidaan tarkkailla ja valokuvata [35], [53].



Kuva 4.14 Raidesepelinäytteenottokone MUM 9601 [35].





*Kuva 4.15 MUM 9601:n avattu sydämnäytepora [53].*

MUM-9601 sisältää myös seulontalaitteiston, jonka avulla näytteiden nopea analysointi on mahdollista. Ruotsissa näytteestä lasketaan 31,5 mm seulan läpäisevän aineksen osuus. Suurin ongelma on määrittää tukikerroksen ja alusrakenteen välinen rajapinta, jotta näytteestä saadaan nimenomaan tukikerrosta edustava. Tukikerros puhdistetaan mikäli raiteen keskeltä otetussa näytteessä 31,5 mm seulan keskimääräinen läpäisy on yli 40 %. Käytössä on myös digitaalinen tiedontallennusjärjestelmän, johon on mahdollista syöttää huomioita näytteenotosta ja tarkat tiedot näytteenottopaikasta, ajankohdasta jne. [35], [53].

Manuaalisessa näytteenotossa tulisi tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi näytteet ottaa aina samasta kohtaa rataprofiilia. Manuaalinen näytteenotto on melko työlästä ja vaatii vähintään kaksi työntekijää toisen toimiessa turvamiehenä. Kuitenkin vilkkaasti liikennöidyllä radalla saattaa käsin tehtävä näytteenotto olla MUM-9601:stä tehokkaampaa, koska manuaalinen näytteenotto voidaan tehdä ilman raidevarausta [28].



MUM-9601:n työvuoron kustannukset ovat vuoden 1999 tasolla n. 30 000 kruunua. Työvuoron aikana saadaan 20 näytettä. Tällöin yhden näytteen kustannus on n. 1000 markkaa. Manuaalisesti otetun rakeisuuslukunäytteen kustannus on tästä noin puolet, 500 markkaa.

#### 4.4.3 Radiometriset menetelmät

DB ja MAV ovat testanneet radioisotooppien vaimennukseen perustuvaa menetelmää tukikerroksen hienoainespitoisuuden määrittämisessä. Menetelmässä gammasäteitä lähettävä säteilylähde työnnetään tukikerroksen pohjalle. Pinnalla sijaitseva vastaanotin mittaa saapuvan säteilyn intensiteettiä. Hienoainespitoisuus ei ole ainoa säteilyn absorptiota lisäävä ominaisuus, sillä myös kivilaji, tukikerroksen tiiveys ja kosteuspitoisuus vaikuttavat vaimenemiseen. Tästä syystä menetelmää ei ole otettu käyttöön [21].

Iso-Britanniassa on tutkittu laboratorio- ja testirataolosuhteissa maatutkan soveltuvuutta tukikerroksen ominaisuuksien ja kerrospaksuuden arviointiin. Tulokset ovat varsin lupaavia. Laboratoriossa määritettiin aaltojen etenemisnopeudet ja dielektrisyysvakiot eri tyyppisille sepeliaineiksille. Dielektrisyysvakio loppuun käytetyllä sepelillä oli huomattavasti uutta sepeliä suurempi (taulukko 4.4) [4].

*Taulukko 4.4 Eri tyyppisten materiaalien dielektrisyysvakiot ja aallon etenemisnopeudet [4].*

| Materiaali                                  | Dielektrisyysvakio | Etenemisnopeus (m/s) | Tiheys (Mg/m <sup>3</sup> ) |
|---|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| Ilma  | 1                  | $3.00 \times 10^8$   |                             |
| Vesi  | 81                 | $0.33 \times 10^8$   | 1                           |
| Kuiva, puhdas sepeli                        | 3.0                | $1.73 \times 10^8$   | 1.6                         |
| Märkä, puhdas sepeli<br>(lisätty 5 % vettä) | 3.5                | $1.60 \times 10^8$   |                             |
| Kuiva, loppuun<br>käytetty sepeli           | 4.3                | $1.45 \times 10^8$   | 1.8                         |

Testiradalla tehdyissä mittauksissa kävi ilmi seuraavia asioita:

- Aallot eivät läpäise betoniratapölkkyä
- Kiskot eivät häiritse aaltojen tunkeutumisen silloin, kun etäisyys kiskoon on yli 50 mm.
- Puhtaan ja kuluneen, samoin kuin kuluneen ja loppuun käytetyn sepelin välillä on aallon heijastusajassa havaittavissa selvä porras
- Testiradalla voidaan tarkasti määrittää dielektrisyysvakiot tietyn tyyppisille sepeleille eri kosteuspitoisuuksissa
- Menetelmällä voidaan tukikerroksen paksuus laskea varsin tarkasti [4].

#### 4.5 Tukikerroksen puhdistusraja

Tukikerroksen puhdistusrajalla tarkoitetaan sitä hienoainesmäärän raja-arvoa, jossa hienoaineksen poistaminen sepelikerroksesta on edullisin kunnossapitoratkaisu. Raiteen geometrian pitäminen tyydyttävällä tasolla on puhdistusrajalle likaantuneella tukikerroksella mahdotonta [50]. Tällöin tukikerros on saavuttanut taloudellisen käyttöikänsä. Hienoaines poistetaan kiskoilla kulkevalla sepelinpuhdistuskoneella. Koneen alla liikkuvat kaivuterät irrottavat maa-ainesta ja vetävät sen kuljetinhihnalle, joka kuljettaa aineksen seulontalaitteeseen. Se osa aineksesta, joka ei läpäise seulaa palautetaan takaisin rataa. Nimellispuhdistussyvyys on betoniratapölkkyraiteessa 550 mm ja puuratapölkkyraiteessa 450 mm ratapölkyn yläpinnan tasosta lukien [39].

Päätös tukikerroksen puhdistamisesta on perinteisesti ollut silmämääräiseen arvioon perustuva subjektiivinen paikallistason päätös. Nykyään eri maissa on kuitenkin olemassa joitakin suosituksia puhdistusrajasta [21], [11].

Suomessa käytössä oleva puhdistusraja perustuu rakeisuusluku-näytteenottoon. Näytteitä otetaan yleensä 1 kpl/km. Kustakin näytteestä lasketaan rakeisuusluku 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summana. Tällainen laskentamenettely korostaa hienoimman, alle 1 mm aineksen haitallisuutta, koska tämä osuus tulee huomioiduksi kolmeen kertaan. Menetelmää voidaan pitää oikean suuntaisena. Puhdistusraja saavutetaan, kun tarkastelun alaisen osuuden keskimääräinen rakeisuusluku ylittää arvon 88.

ERRI:n suositus puhdistusrajasta perustuu vuonna 1991 sen jäsenmailleen tekemään kyselyyn. Tuolloin ainoastaan kahdella jäsenrautatietyhtiöllä oli olemassa muu kuin subjektiivinen peruste puhdistusrajalle. Kyselyn vastausten nojalla esitetään puhdistusrajaksi 30 % läpäisyä 22,4 mm seulalla. Perusteluna rajaan on, että tällä hienoainespitoisuudella ei tukemisella enää voida parantaa raidegeometriaa [21], [22], [20].

30 % läpäisy 22,4 mm seulalla vastaa likimäärin rakeisuuslukua 45, mikä on täysin eri suuruusluokkaa kuin RHK:n puhdistusrajana pitämä 88. ERRI:n esittämän puhdistusrajan kelpoisuutta voidaan kyseenalaistaa, koska siinä käytettävä iso seulakoko (22,4 mm) on varsin lähellä alkuperäisen raidesepelin rakeisuusaluetta, jolloin pienikin, siinänsä tukikerroksen toimintaa haittaamaton, rakeen pyöristyminen aiheuttaa rakeen läpäisyn kyseisellä seulalla. Lisäksi kappaleessa 4.1 todetun mukaisesti tukikerroksen suorituskykyä heikentää eniten kaikkein hienorakeisin, alle 1 mm aines

Ruotsissa on käytetty ERRI:n suosituksesta johdettua puhdistusrajaa toisille seulakoille muunnettuna. Rajana on 40 %:n läpäisy 31,5 mm seulalla tai 15 %:n läpäisy 11,5 mm seulalla [2].

Kanadan rautatietyhtiöissä (CP, CN) puhdistusrajaa arvioidaan tukikerroksen huokostilan mukaan. Raekokojakauman ja näytteen huokoisuuden välistä yhteyttä voidaan yleisesti arvioida Fullerin yhtälöllä:

$$P = \left( \frac{d}{D} \right)^n \cdot 100\%,$$



missä

$d$  on tarkasteltu raekoko

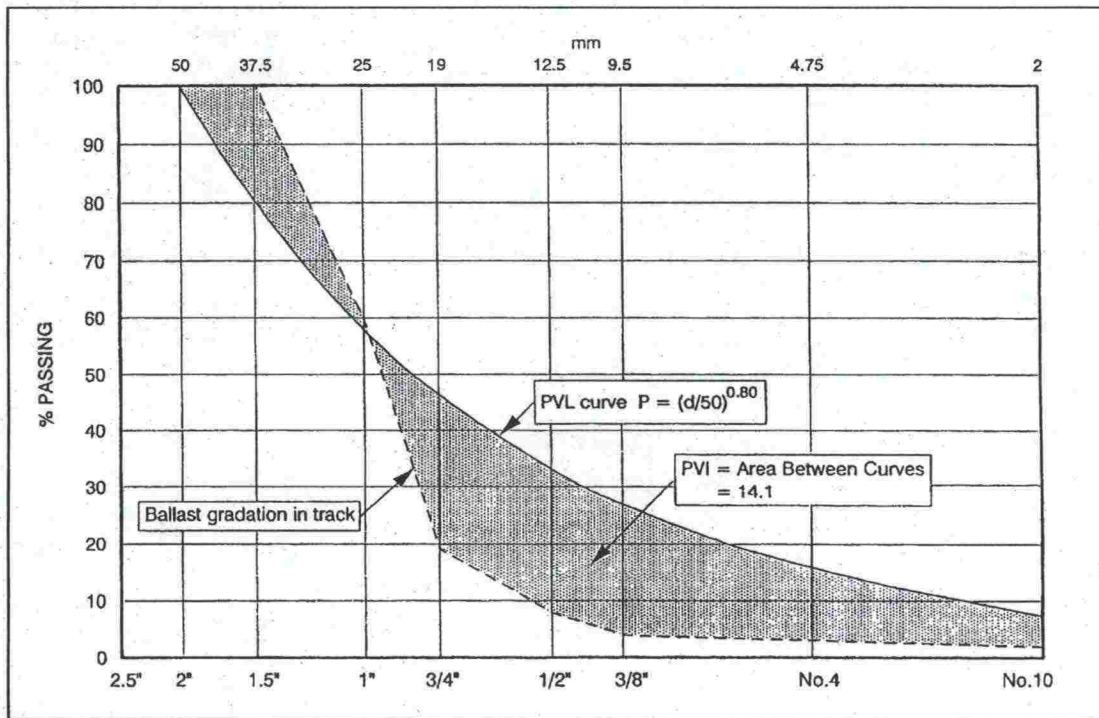
$D$  on suurin raekoko

$P$  on läpäisyprosentti  $d$ :n kohdalla

$n$  on yhteyden määräävä eksponentti

Teoreettisessa sepelin suurinta tiheyttä kuvaavassa yhtälössä  $n = 0,45$ . Tällaisen yhtälön mukaisen käyrän oletetaan kuvaavan huokostilaa sisältämättömän näytteen rakeisuuskäyrää. Todellisen rakeisuuskäyrän poikkeaman suuruus maksimitiheyskäyrään nähden kuvaa sepelin sisältämän huokostilan määrää. Mitä suurempi on käyrien välinen pinta-ala, sitä suurempi on huokostilavuus [13].

CN:n kenttätutkimuksissa [6] kuitenkin osoittautui, että  $n = 0,80$  Fullerin yhtälössä kuvaa parhaiten huokostilatonta, ts. hienoaineksen täyttämää sepeliä. Tämän yhtälön mukaista käyrää kutsutaan nimellä particle void limit (PVL) (kuva 4.16).



Kuva 4.16 Puhdistusrajan määrittäminen PVL-käyrän avulla [6].

Radasta raiteen keskeltä ratapölkyn alapinnan tasosta alaspäin otetun näytteen rakeisuuskäyrää verrataan PVL:iin. Käyrien välin 4.75 mm ja 50 mm raekokoalueella jäävä pinta-ala on ns. particle void index (PVI). PVI kuvaa tukikerroksen jäljellä olevaa käyttöikää. Tietokoneohjelma laskee PVI:n 4,75-50 mm raekokoalueelta siten, että PVL-käyrän yläpuolella olevan alueen pinta-ala on negatiivinen ja alapuolella oleva pinta-ala positiivinen. Puhdistusraja saavutetaan, kun PVI muuttuu negatiiviseksi [13], [6].

Verrattaessa PVL-käyrää RHK:n rakeisuuslukuun todetaan vastaavuus melko hyväksi [57]. PVL- käyrästä lasketun rakeisuusluvun arvoksi saadaan 85.

AAR:n käyttämä puhdistusraja on 30 % läpäisy 4,75 mm seulalla [11]. Vaatimus on aiemmin esitettyihin nähden huomattavasti väljempi. Tämä johtunee siitä, että Suomessa ja Euroopassa ylipäättään on raideliikenne pääosin sekä tavara- että henkilöliikenteestä koostuvaa sekaliikennettä, jolloin raiteen tasaisuusvaatimus on suurempi kuin Pohjois-Amerikan tavaraliikenneraidoilla.

#### 4.6 Jauhautumista pienentäviä seikkoja

Raidesepelin jauhautumista tukikerroksessa voidaan pienentää seuraavilla toimenpiteillä:

- Minimoidaan tukikerrokseen kohdistuva iskevä rasitus, jota syntyy kiskoatkoksissa, huonoissa hitsausliitoksissa, epätasaisella raiteella, vioittuneen raiteen kohdissa sekä kuluneista pyöristä
- Minimoidaan tukeminen
- Minimoidaan rata- asennusvaiheessa sepelin sisältämän hienoaineksen määrä ja varmistetaan, että rakeisuusjakauma tarjoaa riittävän huokostilan
- Käytetään puuratapölkyjä
- Käytetään jäykkää kiskoa
- Käytetään kovaa ja sitkeää kiviainesta, joka ei ole altista rapautumiselle
- Käytetään muodoltaan kuutiomaista kiviainesta
- Minimoidaan tukikerrokseen ylhäältä päin, pääasiassa avovaunuista kulkeutuva hienoaines
- Varmistetaan riittävällä tukikerrospaksuudella ja välikerroksen rakeisuudella, ettei alusrakenne pääse tunkeutumaan tukikerrokseen
- Varmistetaan tukikerroksen hyvä kuivatus
- Minimoidaan ratapenkereen ja pohjamaan painuminen ja siten syntyvä tukemistarve
- Raivataan vesakot radan välittömästä läheisyydestä

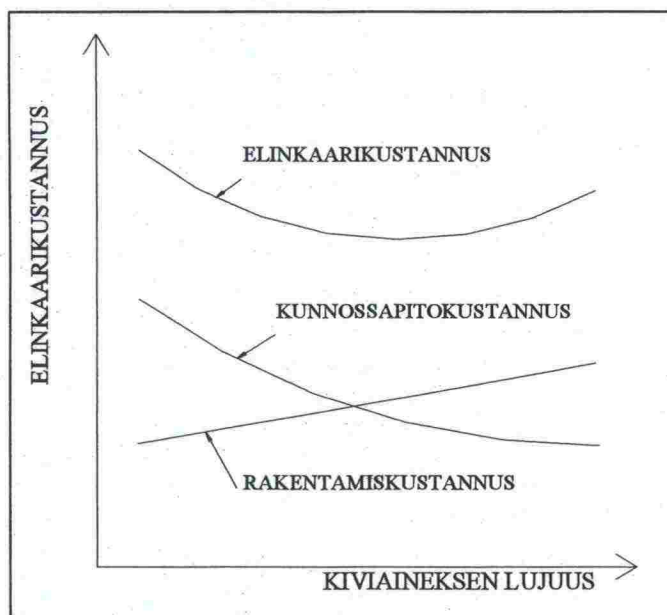


## 5. TUKIKERROKSEN ELINKAARIKUSTANNUKSET

### 5.1 Yleistä

Tukikerroksen elinkaarella tarkoitetaan aikaväliä tukikerroksen rakentamisesta tai puhdistamisesta seuraavaan puhdistusajankohtaan. Tämän aikavälin pituutta sanotaan raidesepelin kestoiksi. BR on arvioinut tukikerroksiensa keskimääräiseksi kestoiksi n. 12-15 vuotta [21]. Suomessa päällysrakenteen luonnollinen kestoikä on n. 40 vuotta, minkä vuoksi RHK:n vaatimus myös raidesepelin kestoiksi on 40 vuotta [41]. Koska eri rataosilla liikkuu vuosittain erisuuria liikennemääriä, on myös kiviaineksen vaatimukset suhteutettava rataosan liikennemäärään, jotta tavoiteltu kestoikä saavutettaisiin.

Elinkaarikustannukseksi kutsutaan käyttöiälle tasan jaettua vuotuista kustannusta (ekvi-valentti vuotuinen kustannus, EVK). Tukikerroksen elinkaarikustannuksiin vaikuttaa tukikerroksen rakentamiskustannukset, kunnossapitokustannukset ja kestoikä. Karkeasti ottaen elinkaarikustannusten muodostuminen kiviaineksen laadun mukaan voidaan hahmotella kuvan 5.1 osoittamalla tavalla. Kuvasta havaitaan, että rakentamiskustannuksiltaan edullisin kiviaines ei todennäköisesti ole edullisin koko elinkaarta ajatellen suurten kunnossapitokustannusten vuoksi.



Kuva 5.1 Hahmotelma elinkaarikustannusten riippuvuudesta kiviaineksen lujuudesta.

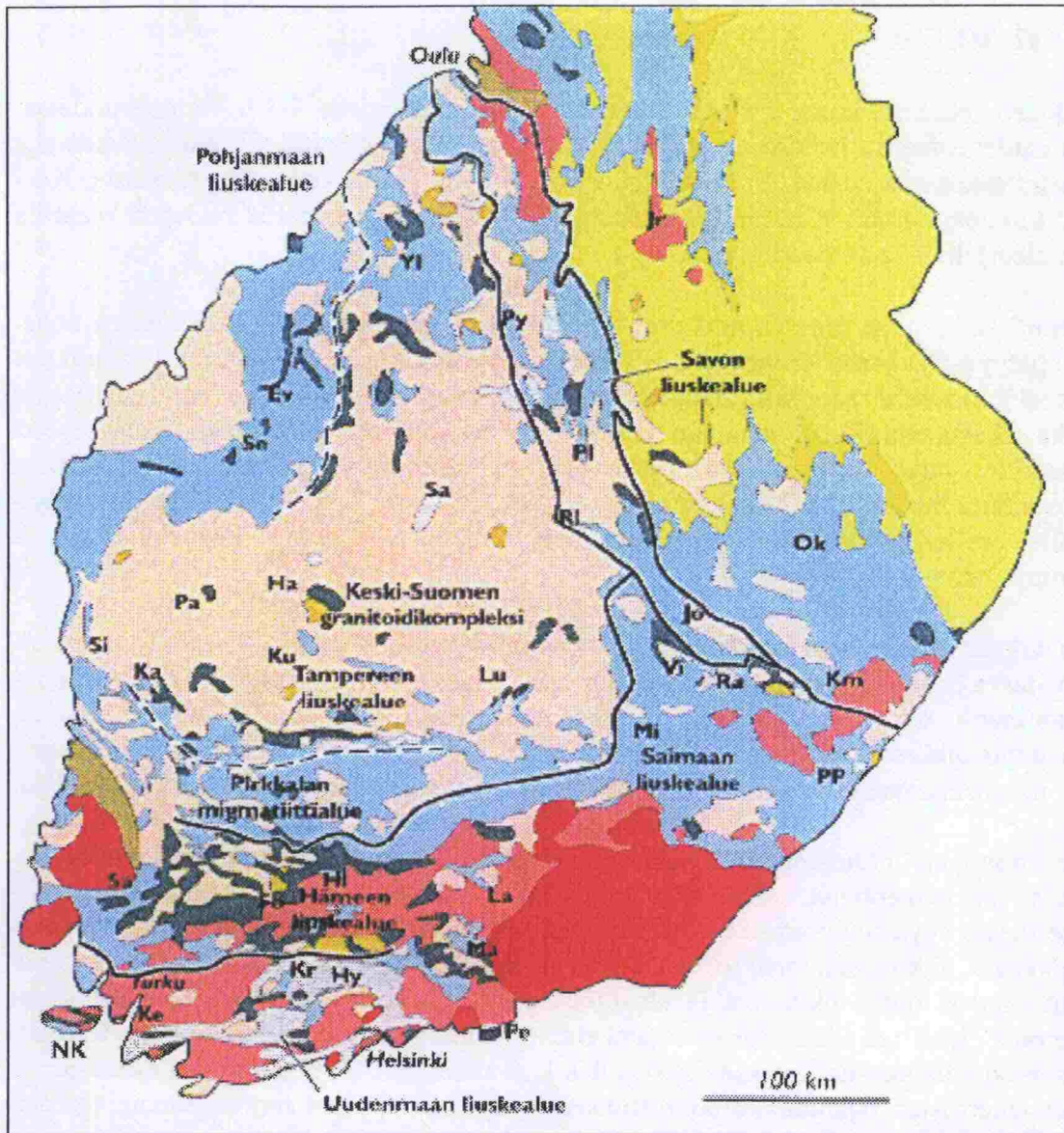
### 5.2 Rakentamiskustannukset

Rakentamiskustannukset sisältävät raidesepelin tuotanto-, varastointi-, kuormaus-, kuljetus- ja asennuskustannukset. Usein RHK:n kannalta ajateltuna ovat tuotantokustannus, louhintapaikan kuormaus- ja varastointikustannus sekä kuljetuskustannus louhintapaikalta radan varren vaununlastauspaikalle yhdistetty hankintakustannukseksi. Hankintakustannus riippuu luonnollisesti kiviaineksen laadusta, tarjonnasta sekä kuljetusetäisyyksistä. RHK käyttää vuosittain raidesepelin hankintaan kymmeniä miljoonia markkoja. Asennus- samoin kuin varastointi- ja kuormauskustannuskaan eivät riipu sepelin laadusta. Varastointikustannuksissa on huomioitava varastointiajan arvonmenetys [36].

Suomen kallioperän kiviaines on pääsääntöisesti erittäin lujaa verrattuna muihin maihin, mutta alueellisia vaihteluita laadussa esiintyy. Kaikista maa- ja kallioperän rakennusmateriaalien käyttökohteista kohdistuu raidesepeliin suurimmat rasitukset [52]. Kuvan 5.2 yleistetyssä kallioperäkartassa tummanvihreät eli metavulkaniittialueet ja vaaleanpunaiset eli graniittialueet ovat pääsääntöisesti lujien kivilajien alueita [33]. Ongelmallisia alueita hyvälaatuisen raidesepelin saatavuutta ajatellen ovat etenkin Kaakkois-Suomen rapakivialue sekä Pohjanmaan liuskealue eli kuvan 5.2 tummanpunaiset ja vaaleansiniset alueet. Ongelmaa lisää se, että maamme suurimpia liikennemääriä välittävät rataosuudet sijoittuvat juuri näille alueille, jolloin vaatimukset raidesepelille ovat kaikkein kovimmat. Sepelin kuljetusmatkat ovatkin näillä osuuksilla verraten suuria, esimerkiksi Kokkolan alueelle sepeli kuljetetaan nykyisin Seinäjoelta saakka, jolloin kuljetusmatka pelkästään raiteilla on yli 150 km.

Pohjois-Amerikassa sepelin kuljetusmatkat ovat selvästi suurempia keskimääräisen matkan ollessa 400 km ja pisimmillään jopa 1600 km [9]. Sepelin kuljettaminen näin kaukaa selittyy osaksi sillä, että Pohjois-Amerikassa on alueita, joilta ei löydy minäänlaista kiviainesta ja osaksi sillä, että siellä on arvioitu parempilaatuisen sepelin kuljettaminen kauempaakin elinkaarikustannusten kannalta edullisemmaksi.





Kuva 5.2 Yleistetty Suomen kallioperäkartta. Tumman punaiset ovat rapakivi-alueita, vaalean siniset ovat liuskeita, gneissejä tai migmatiittejä. Lujuudeltaan parhaat kivilajit sijoittuvat tummanvihreille metavulkaniittialueille, tai vaaleanpunaisille graniittialueille [33].

Hankintakustannusten osalta on huomattava, että kivi on uusiutumaton luonnonvara, ja että tiukentuneet ympäristö- ja luonnonsuojelukäytökohdat rajoittavat kiviaineksen ottamista. Suurin pelko tulevaisuudessa ei kuitenkaan liene lujan kiviaineksen loppuminen, vaan sen ottamisen säätely ja siitä seuraava hankintakustannusten tasainen kasvu. Otto-alueiden vähentymisen seurauksena on lisäksi myös kuljetuskustannuksissa.



## 5.3 Kunnossapitokustannukset

### 5.3.1 Yleistä

Raidegeometria mitataan EMMA-laitteistolla läpi rataverkon 1/3-6 kertaa vuodessa. Kun raidegeometria heikkenee epätydyttävälle tasolle, on raide siirrettävä tukemalla takaisin oikeaan asemaan. Epätydyttävä taso riippuu radan kunnossapitotasosta. Korkean kunnossapitotason radoilla tukemista edellytetään pienemmillä raidepoikkeamilla kuin alempiluokkaisilla radoilla.

Aiemmissa luvuissa esitetyn mukaisesti raidesepelin laatu vaikuttaa siihen miten nopeasti epätydyttävä taso saavutetaan ja siten kunnossapitokustannuksiin. Siksi varsinkaan korkealuokkaisilla radoilla ei hankintahinnaltaan edullisin sepelimateriaali yleensä ole elinkaarikustannuksiltaan edullisin. Lisäksi on huomattava, että tukemisessa sepeliä rikkoontuu, mikä edelleen lisää myöhempää tukemistarvetta. Tästä syystä on erittäin tärkeää, että rataa tuetaan vasta silloin, kun raidegeometria todellakin laskee epätydyttävälle tasolle, ja että tukemista ei uloteta tyydyttävälle alueelle, kuten Suomessa on aiemmin tehty.

Kun tukikerroksen laatu heikkenee, eli hienoainespitoisuus kasvaa, lisääntyy radan tukemistarve ja siten kunnossapitokustannukset. Tietyssä vaiheessa on tukikerroksen puhdistaminen ja uudelleensepelöinti tukemista edullisempi vaihtoehto. Tässä vaiheessa on saavutettu tukikerroksen taloudellinen käyttöikä ja tämän vaiheen rakeisuusjakaumaan olisi puhdistusraja saatava liitettyä, jotta edullisin puhdistusajankohta voidaan määrittää.

Kun kunnossapitotoimenpidettä valitaan, on ensin selvitettävä mistä syystä raidegeometria on heikentynyt, sillä syy voi olla myös sepelistä riippumaton. Pohjois-Amerikassa syyn selvittämiseksi on kaivettu pohjamaahan ulottuva ratarakenteen poikkileikkaava tutkimuskuoppa, josta nähdään esimerkiksi onko pohjamaahan muodostunut liukupinta tai onko tukikerros ja alusrakenne sekoittuneet. Tällaisissa tapauksissa on tehotonta puhdistaa tukikerros estämättä em. ongelmien syntyminen uudelleen. Tukikerroksen tai alusrakennekerroksen korkeuden kasvattaminen tai geotekstiilin asentaminen rakennekerrosten rajapinnalle puhdistuksen yhteydessä voivat tarjota pitempiaikaisen ratkaisun ongelmaan [11]. Liitteen 1 kohdassa 5 on esitetty mahdollisia alusrakenteesta ja pohjamaasta johtuvia ongelmia.

Muita sepelistä riippumattomia ongelman aiheuttajia voivat olla kiskon jatkokset tai huonot hitsausliitokset. Tällaisissa kohdissa kiskon kunnostus tai jatkuvakiskoraiteeksi muuttaminen ovat pitkän tähtäimen ratkaisuja. Ongelmia on usein myös raiteen jäykkyyden muutoskohdissa, kuten vaihteissa ja sillan päissä. Näissä kohdissa tukemista tehokkaampi toimenpide voisi olla siirtymäalueen muodostaminen raiteen jäykkyydelle ratapolkkyväliä tai alusrakenteen jäykkyyttä muuttamalla [11].

### 5.3.2 BALLAST2 – malli elinkaarikustannusten minimoimiseksi

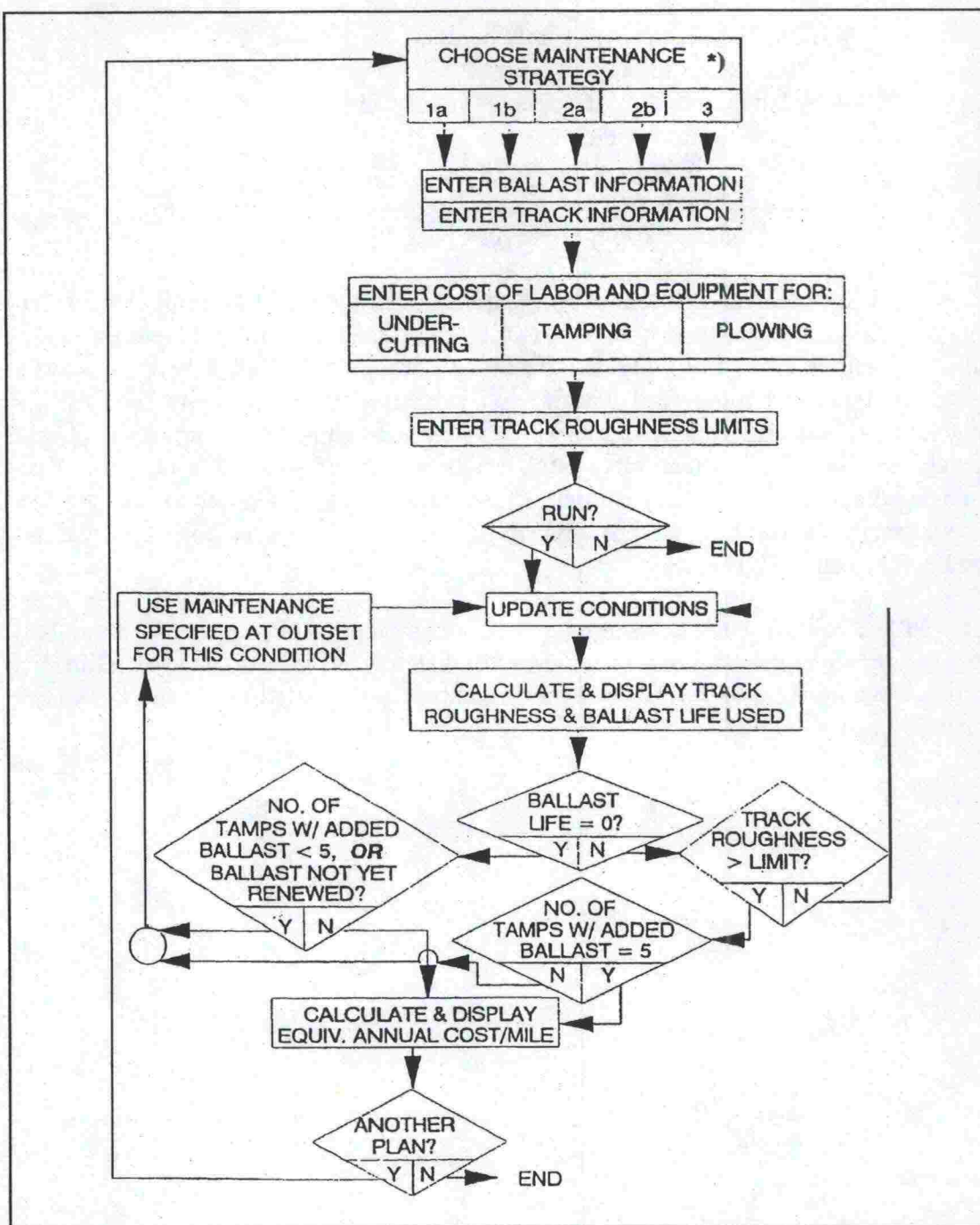
AAR on kehittänyt BALLAST2- mallin, jonka avulla voidaan arvioida eri muuttujien vaikutusta tukikerroksen elinkaarikustannukseen (EVK) ja siten tehdä edullisimmat valinnat. Malli perustuu Pohjois-Amerikassa tehtyihin kenttä- ja laboratoriotutkimuksiin. Muuttujina BALLAST2:ssa ovat



- raidesepelin laatu
- ratapölkkyateriaali (puu / betoni)
- rataosuuden liikennemäärä (MGT)
- radan kunnossapitotaso, epätyydyttävän tason raja
- kunnossapitomenetelmä
- raidesepelin kuljetusmatka (kiskoilla ja tiellä)
- tukikerroksen paksuus
- pohjamaan kokoonpuristuvuus [12], [11]

BALLAST2 laskee elinkaarikustannuksen sekä kestojen annetuilla muuttujien arvoilla. Malli arvioi tukikerroksen tilan kehitystä vallitsevissa olosuhteissa eli annetuilla lähtöarvoilla aina siihen saakka, kunnes jäljellä oleva kestoikä = 0. Tähän hetkeen saakka kertyneet kustannukset muutetaan nykyarvoon ja jaetaan tasaisesti kestoille. Arvoja muuttamalla voidaan tarkastella muutoksen vaikutusta elinkaarikustannuksiin. Tällä tavoin etenemällä saadaan määritettyä elinkaarikustannuksen minimoiva ratkaisu. Vastaavalla tavalla voidaan vertailla esimerkiksi eri kunnossapitovaihtoehdoista syntyviä eroja elinkaarikustannuksissa tai kustannuslisää, joka syntyy puuratapölkkyjen vaihtamisesta betoniseksi [12], [11].

BALLAST2:ta voidaan käyttää kunnossapitovaihtoehtojen kustannusvertailussa, mikäli on varmistettu siitä, että ongelman syyt ovat kohdistettavissa nimenomaan sepeliin. Eri kunnossapitovaihtoehtojen mukaisten elinkaarikustannusten vertailu perustuu kuvan 5.3 mukaiseen mallikaavioon [11], [12].



Kuva 5.3

BALLAST2: n mallikaavio [12].

\*) Vaihtoehdot kunnossapitomenetelmät ovat:

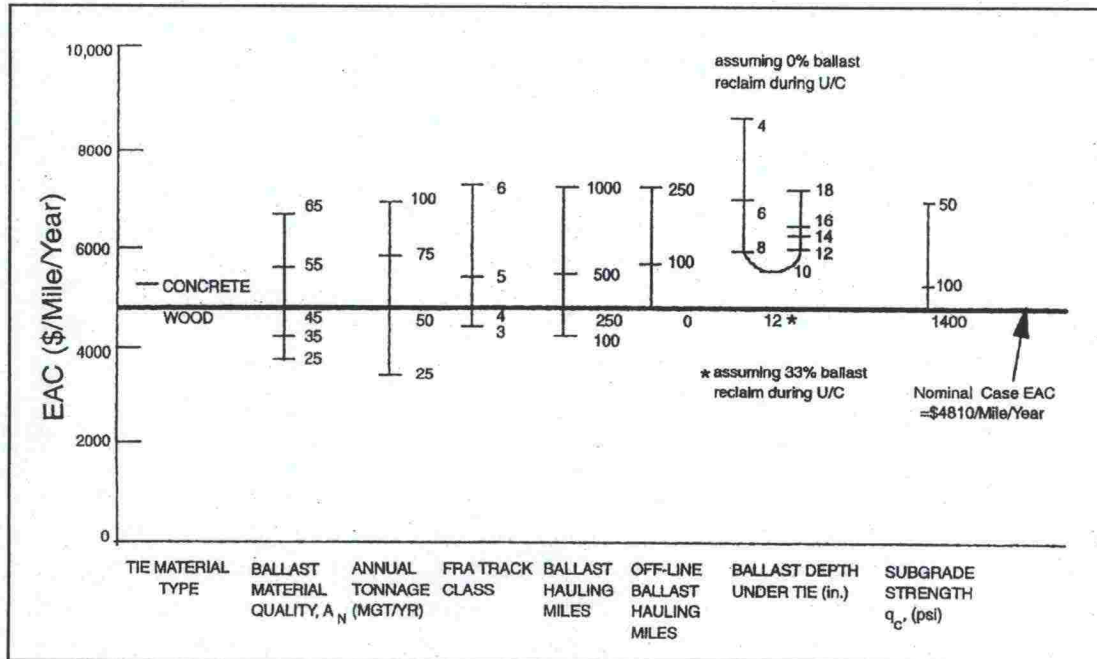
- 1a) Seulonta 1. vuonna palauttamalla karkeat rakeet takaisin Myöhemmin tarvittaessa tuenta.
- 1b) Koko tukikerroksen uusinta 1. vuonna. Myöhemmin tarvittaessa tuenta.
- 2a) Tuenta 1. vuonna. Myöhemmin kestoikä saavutettaessa seulonta.
- 2b) Tuenta 1. vuonna. Myöhemmin kestoikä saavutettaessa koko tukikerroksen uusinta.
- 3) Tuenta 1. vuonna ja aina tarvittaessa. Lisätään aina tarvittava määrä täydennyssepeä. Ei puhdisteta lainkaan.



Ohjelmalle syötetään tiedot kiviaineksesta ja radasta sekä kunnossapitomenetelmien kustannukset. Raiteen epätasaisuudelle valittu raja (roughness limit) määrää tason, jolloin kunnossapitotoon on syytä ryhtyä. BALLAST2 laskee jatkuvasti liikennekuormituksen ja kunnossapitotoimenpiteiden synnyttämää raiteen epätasaisuutta rakennekerrosten painumien perusteella. Jäljellä olevaa käyttöikää lasketaan syntyvälle hienoainekselle vapaana olevan huokostilan perusteella. Kun raiteen epätasaisuus ylittää annetun rajan, toteutetaan valittu kunnossapitotoimenpide. Tämän seurauksena epätasaisuus pienenee tietyllä tasolle alkaen jälleen lisääntyä painumien seurauksena. Kun tällainen sykli on toistunut riittävän monta kertaa, jäljellä oleva käyttöikä on 0. Tällöin ohjelma tulostaa kyseisellä kunnossapitomenetelmällä syntyvän EVK:n sekä kestoaikaa [12], [11].

#### Eri muuttujien vaikutus elinkaarikustannukseen BALLAST2 :n mukaan:

BALLAST2:n herkkyys eri muuttujille on esitetty kuvassa 5.4. Kuvasta nähdään, että tietyt muuttujat, kuten radan kunnossapitotaso ts. epätyydyttävän tason raja, tukikerroksen paksuus, kiviaineksen laatu ja alusrakenteen jäykkyys vaikuttavat elinkaarikustannuksiin eksponentiaalisesti, kun tietyjen muuttujien vaikutus on lineaarinen. Kuvassa esitetyillä oletusarvoilla elinkaarikustannus (EAC) on \$ 4810 / maili / vuosi [11].

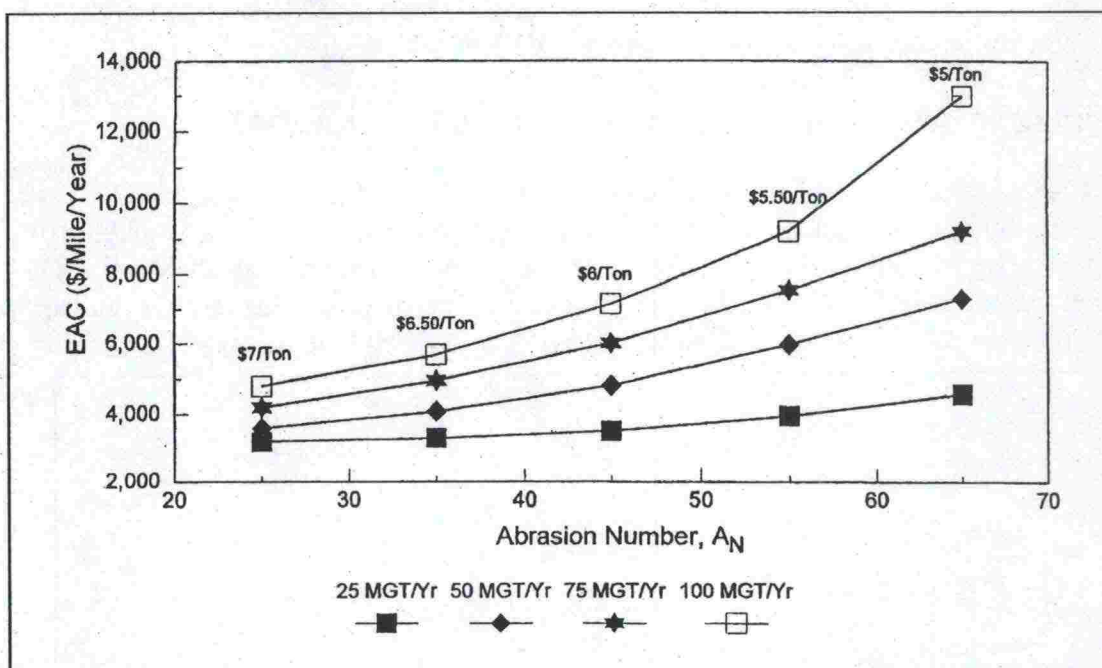


Kuva 5.4 BALLAST2:n herkkyys muuttujille [11].

Mallin mukaan oletusarvotilanteesta ratapölkkyateriaalin vaihto puusta betoniin nostaa EVK:n \$ 4810:sta \$ 5350:een mailia kohti, mikä vastaa 11 %:n korotusta. Tämä johtuu betoniratapölkyn raidesepeliin synnyttämästä ankarammasta kuormitusympäristöstä. Tukikerroksen kestoikä betoniratapölkkyraiteessa on 10 vuotta puuratapölkkyraiteen 13 vuoden sijaan eli 77 % [11].

Kiviaineksen laadulla on suuri vaikutus elinkaarikustannukseen. Laatua kuvataan lujuuskoetuloksista lasketulla indeksillä, hioutuvuusluvulla (abrasion number, ks 5.4.2). Kun hioutuvuusluku kasvaa ts. kiviaineksen lujuus heikkenee, kasvaa EVK eksponentiaalisesti huolimatta alenevasta hankintakustannuksesta (kuva 5.5) [11].

Vuotuisen liikennemäärän (MGT) kasvu luonnollisesti lisää elinkaarikustannusta vuotuisen kuormituksen lisääntyessä. EVK:n kasvaa eniten silloin, kun rataosuudella on sekä suuri vuotuinen liikennemäärä, että heikko kiviaines. Pienemmillä liikennemäärillä (< 30 MGT / vuosi) kiviaineksen laadun merkitys elinkaarikustannukseen vähenee oleellisesti (kuva 5.5) [11]. Tämä on RHK:n kannalta oleellinen tieto, sillä vuotuiset liikennemäärät ovat Suomessa vilkkaimmin liikennöidyilläkin radoilla 20 MGT:n luokkaa.



Kuva 5.5 BALLAST2- mallin mukaiset elinkaarikustannukset eri laatuksilla kiviaineilla ja eri suurilla vuotuisilla liikennemäärillä [11].

Radan kunnossapitotaso määrää sen tason, jolle heikentynyttä raidegeometriaa on kunnossapitotoimin korjattava. Korkean kunnossapitotason radoilla sallitut poikkeamat ovat pieniä ja raidesepeliä särkevä tukeminen siten runsasta. Malli huomioi myös sen, että tasaisella radalla syntyvä dynaaminen kuormitus on pienempi kuin epätasaisella radalla [12]. BALLAST2:n mukaan kunnossapitotason vaikutus elinkaarikustannuksiin on merkittävä. EVK kasvaa eksponentiaalisesti kunnossapitotason kasvun myötä [11].

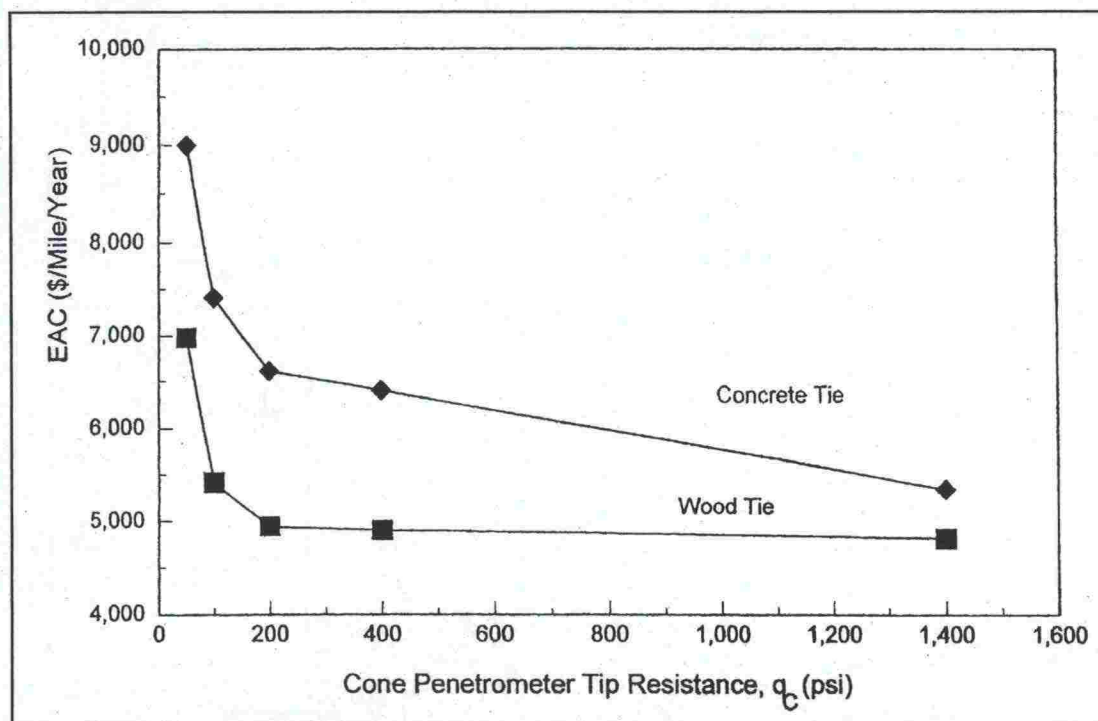
Puhdistusmenetelmistä on BALLAST2:n mukaan seulonta edullisin, jos rataa palautettavaa ainesta on enemmän kuin n. 30 %. Mikäli karkean raekoon ainesta on vähemmän, on tukikerroksen kokonaan poistaminen seulontaa kannattavampaa [10].

BALLAST2:lla voidaan vertailla myös kiviaineksen kuljettamisen kannattavuutta eri louhoksilta. Elinkaarikustannusvertailussa huomioidaan erilaatuisten kiviainesten ero kestoikässä sekä kuljetus- ja tuotantokustannuksissa [11].

Tukikerroksen paksuuden suhteen BALLAST2:sta käy ilmi, että heikkolaatuisella raidesepelillä tarvitaan hyvälaatuisia paksumpi tukikerros EVK:n minimoimiseksi [11].



Pohjamaan vaikutus tukikerroksen elinkaarikustannuksiin on pieni paitsi silloin, kun pohjamaan jäykkyys on heikko. Tällöin pohjamaan suuren painuman johdosta tarvitaan usein tukemista, mikä johtaa kestoiän vähenemiseen ja elinkaarikustannusten kasvuun. Vaikutus korostuu jäykkyydeltään alhaisessa pohjamaassa betoniratapölkkyradassa (kuva 5.6) [11].



Kuva 5.6 Tukikerroksen elinkaarikustannusten riippuvuus pohjamaan jäykkyydestä puu- ja betoniratapölkkyradassa BALLAST2- mallin mukaan. Suuri Cone Penetrometer Tip Resistance kuvaa jäykkää pohjamaata [11].

## 5.4 Kestoikä

### 5.4.1 Yleistä

Mitä pidempi on tukikerroksen kestoikä, sitä useammalle vuodelle voidaan rakentamiskustannukset jakaa elinkaarikustannusta laskettaessa. Kestoikä voidaan katsoa saavutetuksi silloin, kun tukikerros on puhdistusrajaan saakka likaantunut. On luonnollista, että hyvälaatuisella raideseipelillä saavutetaan huonompaa pidempi kestoikä.

Kestoiän etukäteisarviointiin on sekä Suomessa että Pohjois-Amerikassa käytetty eri elinkaaren vaiheissa samoista paikoista radasta otettujen näytteiden vertailua. Tarkastelun kohteena on hienoaainespitoisuuden kasvun yhteys kumulatiivisen liikennemäärän kasvuun, sillä rakeisuuden on todettu korreloivan kumulatiivisen liikennemäärän kanssa huomattavasti aikaa paremmin. Korrelaatio on tutkimusten nojalla arvioitu elinkaaren alun voimakkaan hienoaainespitoisuuden kasvun jälkeen likimäärin lineaariseksi, joskin jatkotutkimuksia aiheesta tarvitaan. Tutkimuksia on tehty eri laatuksilla kiviaineksilla.

#### 5.4.2 Olemassa olevat arviot tukikerroksen kestoikästä

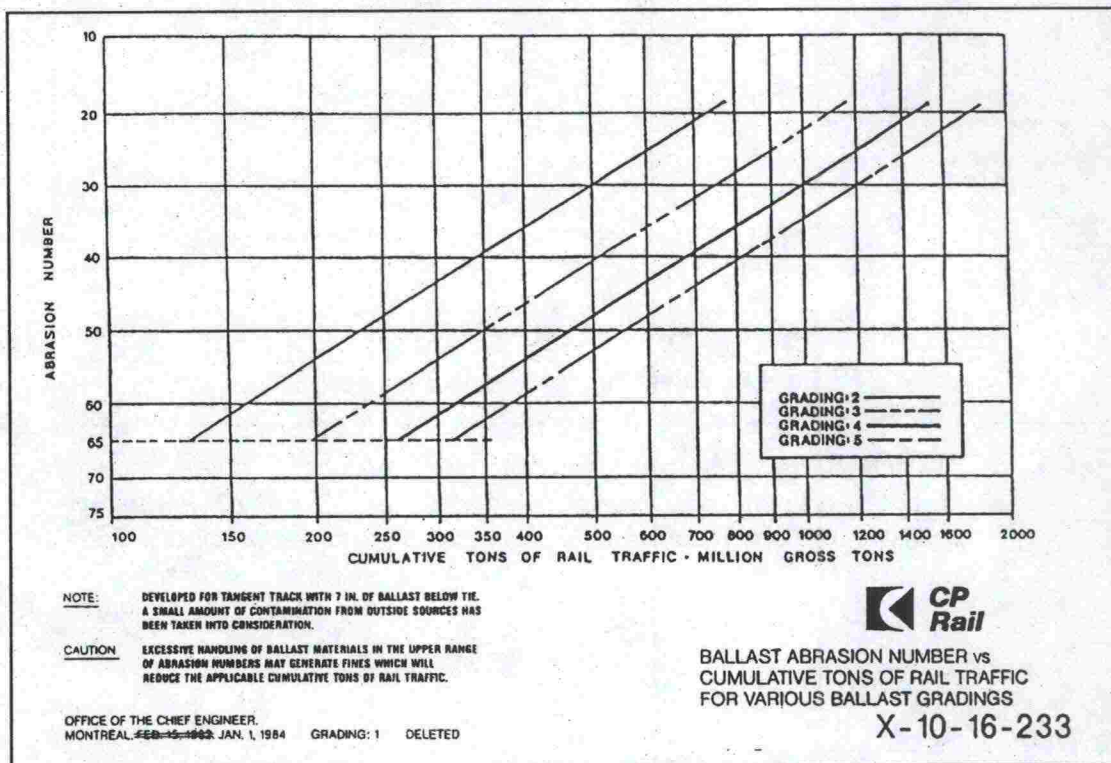
Pohjois-Amerikassa tehtyjen tutkimusten pohjalta on saatu kuvan 5.7 mukainen arvio tukikerroksen kestoikästä kumulatiivisen bruttoliikenmäärän suhteen eri kivilaaduilla. Eri suorat kuvaavat erityyppisiä sepeliraaka-aineen raekokojakaumia. Lähinnä RHK:n karkean raidesepelin raekokojakaumaa ovat "grading 4" ja "grading 5" Abrasion number ( $A_N$ ), hioutuvuusluku on testituloksista alla olevan kaavan mukaisesti laskettu kiviaineksen lujuutta kuvaava indeksi.

missä

$LosA$  on Los Angeles-luku (iskunkesto)

$$A_N = LosA + 5 \cdot MA,$$

$MA$  on Mill Abrasion-luku (hioutuvuuden kesto)



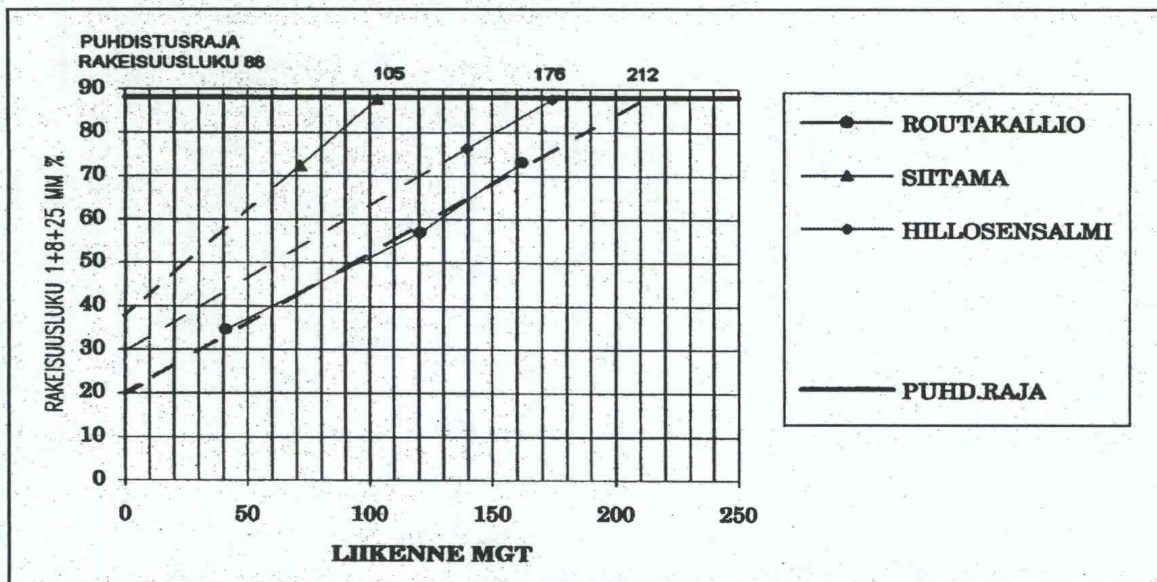
Kuva 5.7 Pohjoisamerikkalainen arvio lujuuden vaikutuksesta kestoikään kumulatiivisena liikennemääränä [5].

Mitä suurempi hioutuvuusluku on, sitä heikompi on kiviaines. Testimenetelmien erilaisuudesta johtuen  $A_N$ :ia ei voida suoraan muuntaa vastaamaan RHK:ssä käytössä olevien haurausarvo- ja kuulamylykokeiden tuloksia. Karkeana arviona voidaan sanoa R1-luokan raidesepelillä  $A_N$ :n olevan noin 20 ja R4-luokan raidesepelillä noin 45.

Lähtökohtana kuvan 5.7 laadinnassa on ollut, että kestoikä on saavutettu silloin, kun koko tukikerroksen tyhjätila on hienoaineksen täyttämä, eli kappaleessa 4.5 kuvattu particle void index (PVI) on muuttunut negatiiviseksi. Jäljellä olevaa tyhjätilaa on arvioitu eri vuosina otetuista näytteistä [34].



Kuvassa 5.8 on Uusi-Luomalahden [57] ja Turusen [56] tutkimuksissa samoista kohdista otetuista näytteistä lasketut rakeisuusluvut ottohetkellä vallinneen kumulatiivisen bruttolikennemäärän mukaan. Mikäli riippuvuus oletetaan lineaariseksi leikkaa trendiviiva rakeisuusluvun 88, eli puhdistusrajan tietyn, kestoikää arvioivan liikennemäärän jälkeen.



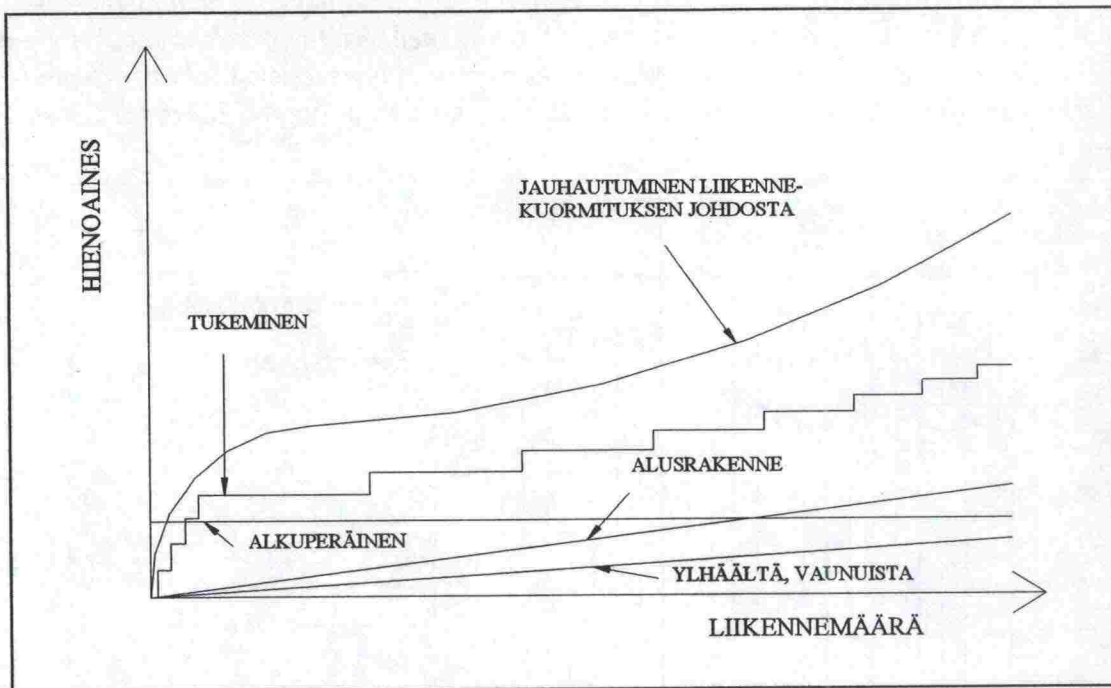
Kuva 5.8 Kestoiän arviointi suomalaisten rakeisuuslukunäytteenottojen mukaan [57].

Hienoainespiteisuuden kasvun lineaarisuutta suhteessa liikennemäärään voidaan arvioida tarkastelemalla kutakin hienoaineslähdetä erikseen. Olemassa olevien teorioiden avulla voidaan hahmotella eri lähteistä peräisin olevan hienoaineksen lisääntymistä elinkaaren edetessä kuvan 5.9 esittämällä tavalla.

Heti rataa asennuksen jälkeen on sepelin rikkoontuminen liikennekuormituksen johdosta runsasta, kun pienemmän lujuuden omaavat pitkulaiset ja litteät rakeet katkeavat. Muodon parantuessa jauhautuminen vähenee. Syntynyt hienoaines kuitenkin kiihdyttää jauhautumista elinkaaren loppua kohti.

Kuvassa 5.9 tukemisen synnyttämä hienoaines on esitetty portaittaisella käyrällä. Aluksi portaita on hyvin taajaan, sillä radan asettuessa vaaditaan runsasta tukemista, kun tukikerros tiivistyy huomattavasti liikennekuorman vaikutuksesta. Usein rata joudutaan tukemaan 3 - 4 kertaa ensimmäisen 10 MGT:n aikana. Kun tukikerros on tiivistynyt luonnolliseen tilaan, tukemisvälit harvenevat. Tukemisen seurauksena syntyvät kuutiomaisemmat rakeet sietävät suurempia jännityksiä, joten yksittäisellä kerralla syntyvä hienoaineksen määrä eli porraskorkeus on pienempi. Radan kunnan heikentyessä tukemista tarvitaan useammin eli porraskorkeus pienenevät.





Kuva 5.9. *Hahmotelma eri lähteistä peräisin olevan hienoaineuksen lisääntymisestä kumulatiivisen liikennemäärän suhteen.*

Vaunuista putoava osuus voidaan olettaa nollassa alkavaksi, tasaisesti lisääntyväksi. Alusrakenteesta tunkeutuvan hienoaineuksen osuutta ei voida edellä kuvattujen teorioiden perusteella yhtä selkeästi arvioida, joten se on oletettu lineaariseksi. Raidesepelin seassa jo rataa asennettaessa oleva, puutteellisen seulun, kuormausten ja kuljetusten yhteydessä syntynyt hienoaines ei ole riippuvainen liikennemäärästä.

Kuvassa 5.8 trendiviivat leikkaavat rakeisuuslukuakselin melko suurissa (20-38) lukemissa, jolloin rakeisuusluvun oletetaan alkavan kyseisestä lukemasta. Kuitenkin vanhan, ennen vuotta 1995 voimassa olleen raidesepelin rakeisuusvaatimuksen mukaan laskettuna rataa laitettaessa raidesepeli sai sisältää hienoainesta keskimäärin rakeisuuslukua 7 vastaavan määrän. Täten kuvan 5.8 mukainen lukema sisältänee alkuperäisessä sepelessä olevan hienoaineen lisäksi radan käytön alkuvaiheiden, ehkä ensimmäisen 10 MGT:n synnyttämän hienoaineen, jonka jälkeen hienoaineen synty saattaa hyvinkin olla melko lineaarista liikennemäärään nähden.

Voidaan kuitenkin todeta, että Uusi-Luomalahden [57] ja Turusen [56] tutkimuksissa otettujen näytteiden määrä on riittämätön pidemmälle meneviin johtopäätöksiin jo pelkästään näytteenoton menetelmävirheen takia. Kuvaan 5.8 ei voitu lisätä kyseisten kohtien tämän hetkisiä rakeisuuslukuja niissä tehdyn sepeleinpuhdistuksen ja puutteellisen km-lukematiedon takia.

#### 5.4.3 Kestoiän arviointi RHK:n laajan rakeisuuslukututkimuksen perusteella

RHK:n toimeenpanemana lähes koko rataverkoltamme (kuva 5.10) on mitattu rakeisuusluvut kilometrin välein 1990-luvun aikana. Samoilta kohdilta on tarkoituksena myöhemmin mitata luvut uudestaan, jolloin pystytään rakeisuuden kehittymistä arvioi-



maan laajemmin. Nyt, kun ensimmäinen kierros ollaan saamassa päätökseen on tutkittuja raidekilometrejä 2198 ja tutkittuja näytteitä n. 1400.

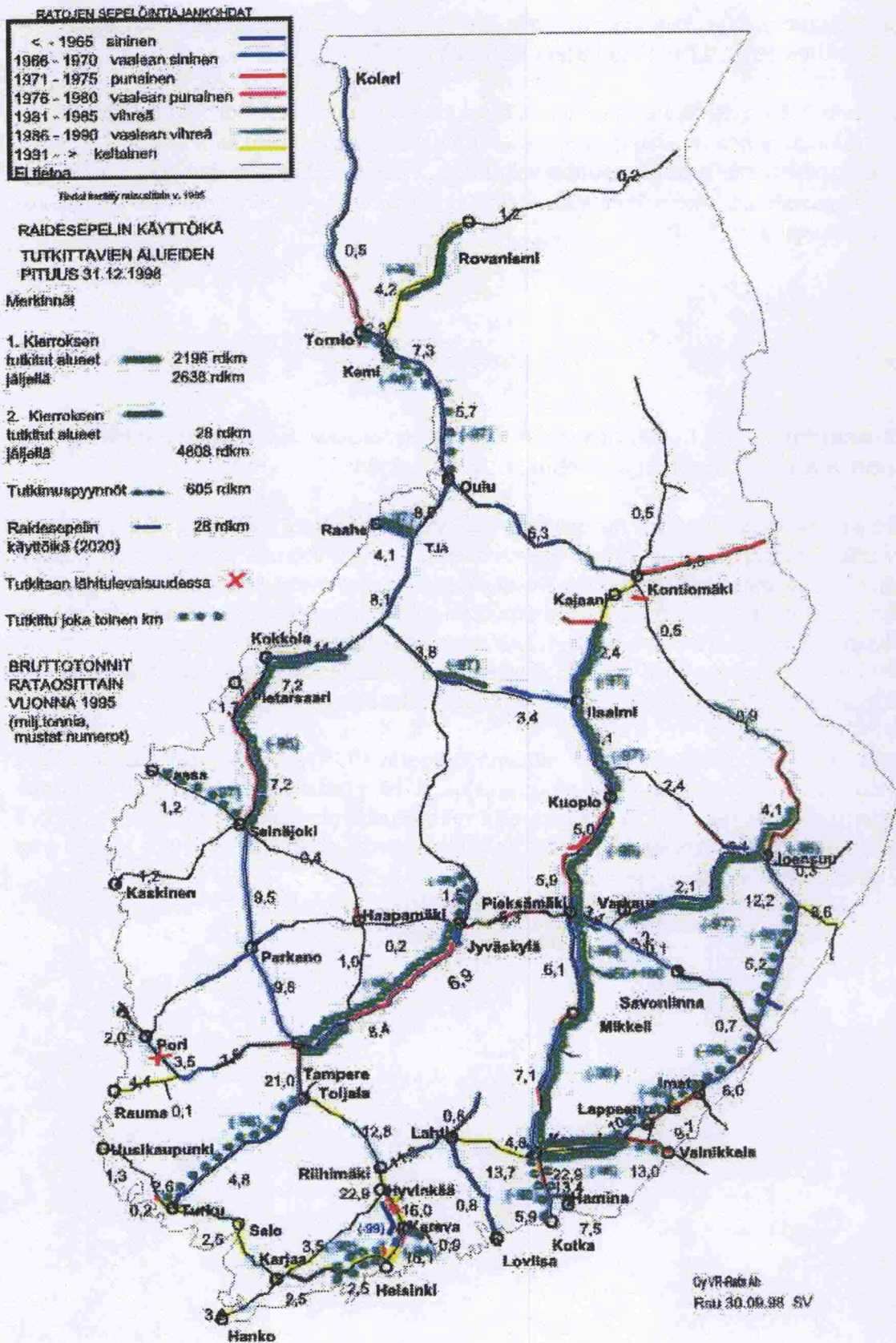
Taulukoon 5.1 on RHK:lle määritetyistä rakeisuusluvuista laskettu kullekin rataosuudelle keskimääräinen rakeisuusluku, sekä kumulatiivinen bruttoliiikennemäärä (MGT) tukikerrokselle näytteenottoajankohtana. Näiden kahden tekijän pohjalta on laskettu rataosuuden tukikerroksen suorituskykyä kuvaava suorituskykyindeksi (SKI) seuraavalla kaavalla:

$$SKI = \frac{MGT}{(Rakeisuushuku - 15)} \cdot 10$$

Mitä suurempi on SKI, sitä vähemmän on tukikerroksessa hienoainesta suhteessa liikennemäärään eli sitä parempi on ollut sen suorituskyky.

SKI:ä laskettaessa mitatusta rakeisuusluvusta vähennetään 15 yksikköä. Tällä pyritään kuvaamaan raidesepelin jo rataan asennettaessa tai välittömästi puhdistuksen jälkeen sisältämää hienoainesta. Lisäksi sen voidaan ajatella sisältävän radan runsaan alkutukemisen ja muodon parantumisen aiheuttamaa suurta hienoaineksen lisäystä tukikerroksen elinkaaren alkuvaiheissa luvussa 5.4.2 esitetyn mukaisesti. Tällä tavoin eri suurien kumulatiivisten liikennemäärien (MGT) kantaneiden rataosuuksien vertailu tulee mielekkääksi, eivätkä alhaisen MGT:n omaavat rataosuudet saa kohtuuttoman heikkoa SKI:ä.

Luku 15 on valittu sillä perusteella, että ennen vuotta 1995 raidesepeli sai sisältää rataan laitettaessa hienoainesta enintään rakeisuuslukua 13 vastaavan määrän [59]. Toisaalta puhdistettu sepeleli saa sisältää hienoainesta rakeisuusluvuksi muunnettuna 22 yksikköä [39]. Laitisen tutkimuksessa [32] todettiin tukikerroksen sisältävän 10-20 % alle 25 mm ainesta ennen radan käyttöönottoa.



Kuva 5.10. RHK:n rakeisuushukunäytteenotto-osuudet näytteenottovuosineen.

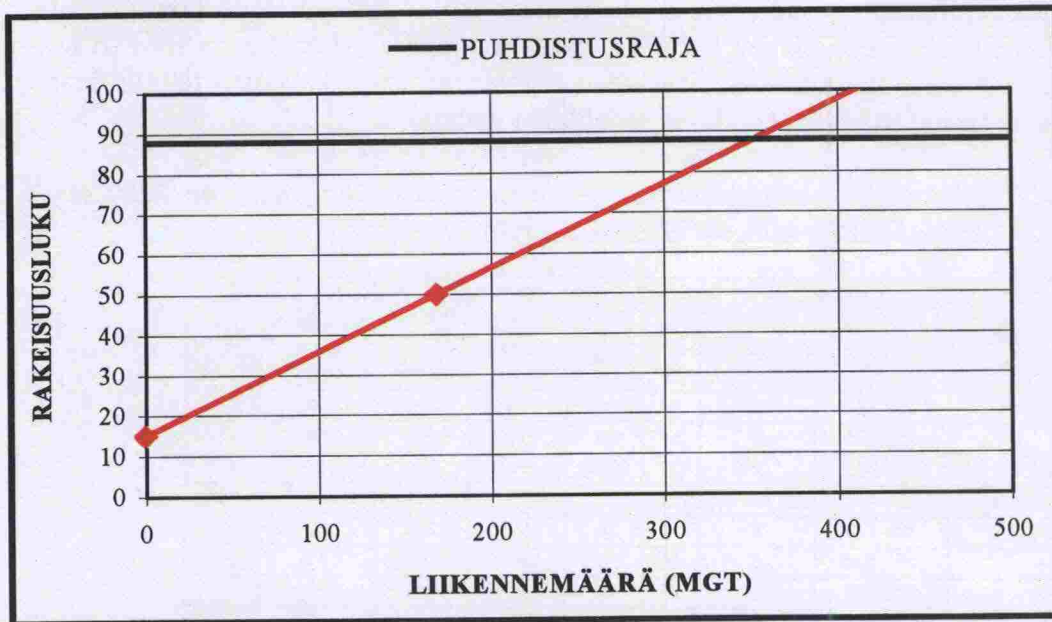


Taulukko 5.1 sisältää kaikki rataosuudet, joille rakeisuusluku tutkimus on tehty lukuunottamatta niitä, joilla näytteenoton jälkeen on tukikerros uusittu. Rataosuudet on katkottu pääasiassa liikennepaikkojen kohdilta, mutta jos rakeisuusluvussa on selvästi havaittava muutos vaikkapa kunnossapitoalueen rajalla, on osuus katkaistu tältä kohtaa, koska on oletettavaa, että tässä kohdassa sepelilaatu vaihtuu.

*Taulukko 5.1. Tiedot niistä rataosuuksista, joille rakeisuusluku tutkimus on tehty sekä rataosuuksille lasketut SuoritusKykyIndeksit (SKI).*

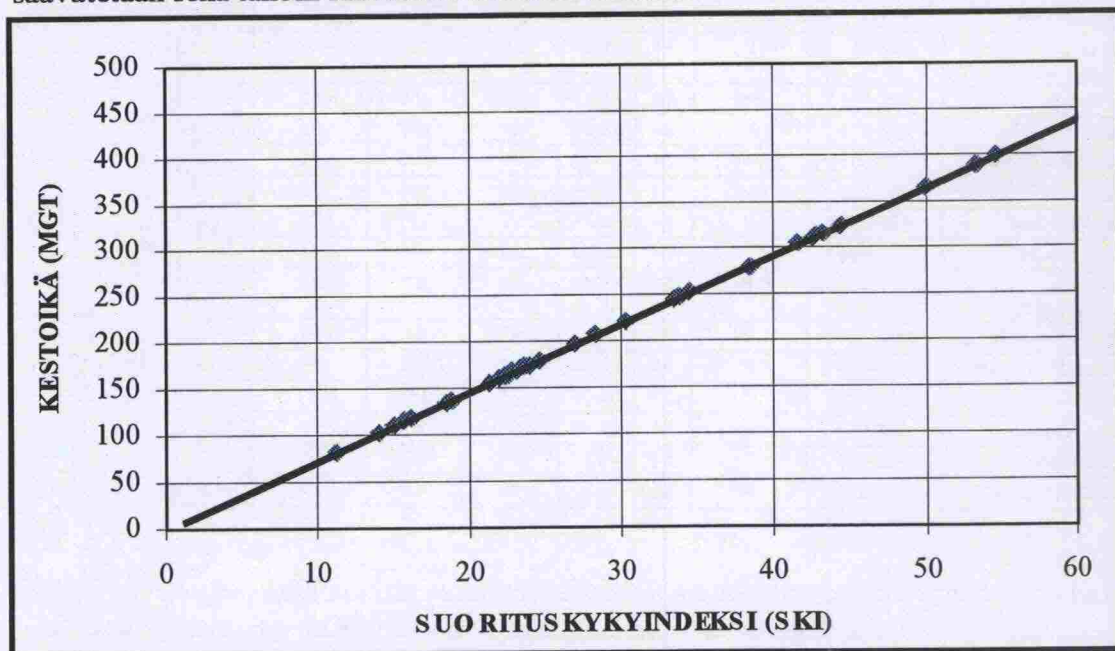
| Rataosuus / raide          | Km      | Rata-<br>pölkky-<br>materiaali | Kisko | Sepelöinti-<br>vuosi | Näytteen-<br>ottovuosi | Kumul.<br>liikenne<br>MGT | Rakeisuus-<br>luku | SKI  |
|----------------------------|---------|--------------------------------|-------|----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|------|
| Lappeenranta-Imatra        | 289-324 | P                              | 54    | 71-74                | 98                     | 200                       | 60                 | 44,4 |
| Oulu-Kemi                  | 753-853 | P                              | 54    | 63                   | 97                     | 169                       | 50                 | 48,3 |
| Kuopio-Alapitkä            | 465-506 | P                              | 54    | 62-68                | 97                     | 186                       | 58                 | 43,3 |
| Seinäjoki-Pännäinen        | 418-537 | Bet                            | 54    | 77                   | 95                     | 141                       | 64                 | 28,8 |
| Alapitkä-Iisalmi           | 506-550 | P                              | 54    | 66                   | 97                     | 200                       | 62                 | 42,6 |
| Iisalmi-Sukeva             | 551-591 | P                              | 54    | 67                   | 97                     | 100                       | 39                 | 41,7 |
| Tuomioja-Raah              | 699-727 | P                              | 54    | 66                   | 97                     | 142                       | 52                 | 38,4 |
| Imatra-Simpele             | 325-355 | P                              | 54    | 66                   | 98                     | 152                       | 59                 | 34,5 |
| Kouvola-Luumäki / 2        | 192-238 | Bet                            | 60    | 86-92                | 96                     | 71                        | 36                 | 33,8 |
| Pieksämäki-Salminen        | 377-427 | P                              | 54    | 72-75                | 96                     | 154                       | 58                 | 35,8 |
| Simpele-Poiksilta          | 379-413 | P                              | 54    | 65                   | 98                     | 152                       | 65                 | 30,4 |
| Kouvola-Luumäki / 1        | 192-238 | Bet                            | 60    | 86-92                | 96                     | 54                        | 34                 | 28,4 |
| Laurila-Tornio             | 866-883 | P                              | 54    | 64                   | 98                     | 84                        | 46                 | 27,1 |
| Voikoski-Mikkeli           | 243-305 | P                              | 54    | 63-78                | 93                     | 180                       | 85                 | 25,7 |
| Orivesi-Jämsänkoski        | 228-288 | P                              | 54    | 76-77                | 96                     | 115                       | 63                 | 24,0 |
| Tampere-Orivesi / 2        | 187-228 | Bet                            | 54    | 60-67                | 96                     | 123                       | 69                 | 22,7 |
| Joensuu-Uimaharju          | 624-674 | P                              | 43    | 66-74                | 96                     | 68                        | 44                 | 23,4 |
| Salminen-Kuopio            | 427-465 | P                              | 54    | 74-78                | 95                     | 125                       | 69                 | 23,1 |
| Leppävaara-Kirkkonummi / 2 | 11-36   | P                              | 54    | 61-63                | 98                     | 87                        | 51                 | 24,1 |
| Ypäjä-Toijala              | 203-147 | Bet                            | 54    | 65                   | 98                     | 153                       | 57                 | 36,4 |
| Turku-Ypäjä                | 204-275 | P                              | 54    | 63-66                | 98                     | 153                       | 81                 | 23,2 |
| Jämsänkoski-Jyväskylä      | 289-333 | Bet                            | 54    | 76-77                | 96                     | 105                       | 62                 | 22,3 |
| Tampere-Orivesi / 1        | 187-228 | Bet                            | 54    | 60-66                | 96                     | 108                       | 62                 | 23,0 |
| Joensuu-Viinijärvi         | 624-657 | P                              | 54    | 62                   | 97                     | 135                       | 78                 | 21,4 |
| Pännäinen-Eskola           | 538-606 | P                              | 54    | 60-63                | 95                     | 138                       | 83                 | 20,3 |
| Leppävaara-Kirkkonummi / 1 | 11-36   | P/Bet                          | 54    | 61-63                | 98                     | 89                        | 61                 | 19,3 |
| Heinävesi-Viinijärvi       | 468-526 | P                              | 54    | 63                   | 97                     | 88                        | 69                 | 16,3 |
| Pyhäsalmi-Haapajärvi       | 617-649 | P                              | 54    | 61-64                | 97                     | 98                        | 77                 | 15,8 |
| Poiksilta-Säkäniemi        | 413-480 | P                              | 54    | 64-66                | 98                     | 138                       | 49                 | 40,6 |
| Varkaus-Joensuu            | 425-624 | P                              | 54    | 62-64                | 97                     | 83                        | 73                 | 14,3 |
| Seinäjoki-Vaasa            | 418-493 | P                              | 54    | 63                   | 97                     | 53                        | 62                 | 11,3 |
| Jyväskylä-Äänekoski        | 377-425 | P                              | 54    | 62                   | 98                     | 45                        | 64                 | 9,2  |

15 yksikön vähennys rakeisuusluvusta SKI:ä laskettaessa järkevöittää oletusta siitä, että rakeisuusluku kasvaisi lineaarisesti liikennemäärän suhteen. Kun alkuperäisen rakeisuusluvun oletetaan olevan 15 ja rakeisuusluvun kasvavan lineaarisesti suhteessa kumulatiiviseen liikennemäärään, voidaan kullekin taulukon 5.1 rataosuudelle piirtää kuvan 5.11 mukainen kuva. Kuvasta käy ilmi tukikerroksen kestoikä kumulatiivisena liikennemääränä eli toisin sanottuna liikennemäärä silloin, kun rakeisuusluku saavuttaa puhdistusrajan (arvon 88). Kuvan Oulu-Kemi rataosuudella, jonka SKI on 48,3, voidaan tukikerroksen kestoiksi arvioida n. 350 MGT.



Kuva 5.11. Arvioitu rakeisuushuvun kehitys Oulu-Kemi rataosuudella ( $SKI = 48,3$ ) kumulatiivisen liikennemäärän suhteen.

Edellä mainituilla oletuksilla voidaan tukikerroksen kestoikä arvioida rataosuudelle lasketun suorituskykyindeksin perusteella kuvan 5.12 mukaisesti. Taulukossa 5.2 on tällä tavoin laskettuna kunkin rataosuuden kestoikä (MGT). Tämän lisäksi taulukossa nähdään vuoden 1998 liikennemäärien pohjalta arvioitu ajankohta, jolloin puhdistusraja saavutetaan sekä tällöin saavutettu kestoikä vuosissa.



Kuva 5.12. Kestoikä  $SKI$ :n funktiona



*Taulukko 5.2. Arvioidut kestoiät sekä niihin ja vuoden 1998 liikennemääriin pohjautuvat puhdistusajankohdat eri rataosuuksilla.*

| Rataosuuks / raide, (ratapölkky) | Kumulatiivinen liikenne (MGT) näytteenottohetkenä | Näytteenottovuosi | Rakelisuusluku näytteenottohetkellä | Kestoiät (MGT) | Lähenne vuonna 1998 (MGT) | Puhdistusajankohta |
|----------------------------------|---|-------------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| Voikoski-Mikkeli                 | 180   | 1993              | 85                                  | 180            | 7,4                       | 1993               |
| Pännäinen-Eskola                 | 138   | 1995              | 83                                  | 138            | 9,5                       | 1996               |
| Turku-Ypää                       | 153   | 1998              | 81                                  | 169            | 6,7                       | 2000               |
| Joensuu-Viinijärvi               | 135   | 1997              | 78                                  | 156            | 5,0                       | 2001               |
| Pyhäsalmi-Haapajärvi             | 98  | 1997              | 77                                  | 115            | 3,5                       | 2002               |
| Orivesi-Jämsänkoski              | 115   | 1996              | 63                                  | 175            | 9,7                       | 2002               |
| Salminen-Kuopio                  | 125   | 1995              | 69                                  | 169            | 5,9                       | 2002               |
| Seinäjohti-Pännäinen             | 141   | 1995              | 64                                  | 210            | 9,5                       | 2002               |
| Tampere-Orivesi / 2              | 123   | 1996              | 69                                  | 166            | 7,3                       | 2002               |
| Jyväskylä-Äänekoski              | 45  | 1998              | 64                                  | 82             | 5,6                       | 2002               |
| Varkaus-Joensuu                  | 83  | 1997              | 73                                  | 104            | 3,7                       | 2003               |
| Jämsänkoski-Jyväskylä            | 105   | 1996              | 62                                  | 163            | 7,2                       | 2004               |
| Kouvola-Luumäki / 2              | 71  | 1996              | 36                                  | 247            | 20,3                      | 2005               |
| Tampere-Orivesi / 1              | 108   | 1996              | 62                                  | 168            | 5,2                       | 2007               |
| Simpele-Poiksilta                | 152   | 1998              | 65                                  | 222            | 6,1                       | 2009               |
| Lappeenranta-Imatra              | 200   | 1998              | 60                                  | 324            | 10,8                      | 2010               |
| Kouvola-Luumäki / 1              | 54  | 1996              | 34                                  | 207            | 11,2                      | 2010               |
| Heinävesi-Viinijärvi             | 88  | 1997              | 69                                  | 119            | 2,3                       | 2010               |
| Pieksämäki-Salminen              | 154   | 1996              | 58                                  | 261            | 6,9                       | 2012               |
| Imatra-Simpele                   | 152   | 1998              | 59                                  | 252            | 6,1                       | 2014               |
| Ypää-Toijala                     | 153   | 1998              | 57                                  | 266            | 6,7                       | 2014               |
| Alapitkä-Iisalmi                 | 200   | 1997              | 62                                  | 311            | 5,9                       | 2016               |
| Seinäjohti-Vaasa                 | 53  | 1997              | 62                                  | 82             | 1,4                       | 2018               |
| Kuopio-Alapitkä                  | 186   | 1997              | 58                                  | 316            | 5,9                       | 2019               |
| Tuomioja-Raahel                  | 142   | 1997              | 52                                  | 280            | 5,2                       | 2024               |
| Joensuu-Uimaharju                | 68  | 1996              | 44                                  | 171            | 3,3                       | 2027               |
| Oulu-Kemi                        | 169   | 1997              | 50                                  | 352            | 5,9                       | 2028               |
| Poiksilta-Säkänieni              | 138   | 1998              | 49                                  | 296            | 5,1                       | 2029               |
| Leppävaara-Kirkkonummi / 1       | 89  | 1998              | 61                                  | 141            | 1,7                       | 2029               |
| Leppävaara-Kirkkonummi / 2       | 87  | 1998              | 51                                  | 176            | 1,7                       | 2051               |
| Laurila-Tornio                   | 84  | 1998              | 46                                  | 198            | 2,0                       | 2055               |
| Iisalmi-Sukeva                   | 100   | 1997              | 39                                  | 304            | 2,0                       | 2099               |

Taulukosta havaitaan, että n. puolella rataosuuksista saavutetaan selvästikin vaadittua 40 vuotta pidempi kestoikä, kun taas joillakin osuuksilla kestoikä jää jopa alle 20 vuoden. On syytä huomata, että vuoteen 2006 mennessä yli kolmanneksella osuuksista saavutetaan puhdistusraja. Taulukon rataosuuksien keskimääräinen kestoikä on liikennemääränä ilmaistuna 216 MGT ja vuosina laskettuna 45 vuotta.

Jotta kestoikää pystytäisiin arvioimaan jo radan rakennusvaiheessa ja valitsemaan kullekin liikennemäärälle edullisin kiviaines, tulisi kestoikä pystyä liittämään ennalta määritettävissä olevaan parametriin, kiviaineksen lujuuteen. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli liittää kuvan 5.12 ja taulukon 5.2 tieto yhteen kenttä- ja laboratoriotutkimuksista saatavan kiviaineksen lujuustiedon kanssa. Tällöin tuloksena olisi suuntaa-antava kuvaaja tukikerroksen kestoiästä kiviaineksen laadun funktiona.



## 6. KENTTÄ- JA LABORATORIOTUTKIMUKSET

### 6.1 Yleistä

Tämän tutkimuksen kenttä- ja laboratorio-osuus voidaan jakaa lujuustutkimukseen ja rakeisuusluvun määrittämiseen.

Lujuustutkimuksen tarkoitus oli arvioida valituilta rataosuuksilta kerättyjen kiviainesnäytteiden lujuutta tavoitteena yhdistää lujuustieto kappaleessa 5.4.3 esitettyyn suorituskykyindeksiin. Tällöin voitaisiin arvioida tukikerroksen kestoikää etukäteen kiviaineksen lujuuden suhteen. Samalla tutkittiin kiviainesmateriaalien muotoominaisuuksia.

Rakeisuuslukuja määritettiin kolmeen tarkoitukseen: näytteenottomenetelmän kelvollisuuden ja tukemisessa syntyvän hienoaineksen määrän arviointiin sekä vertailupohjaksi liitteenä 1 esitetylle silmämääräiselle arvioinnille. Näytteenotto sekä lujuuskokeita että rakeisuuslukuanalyysyjä varten keskitettiin samoilta, kappaleessa 6.2 esitettäville rataosuuksille.

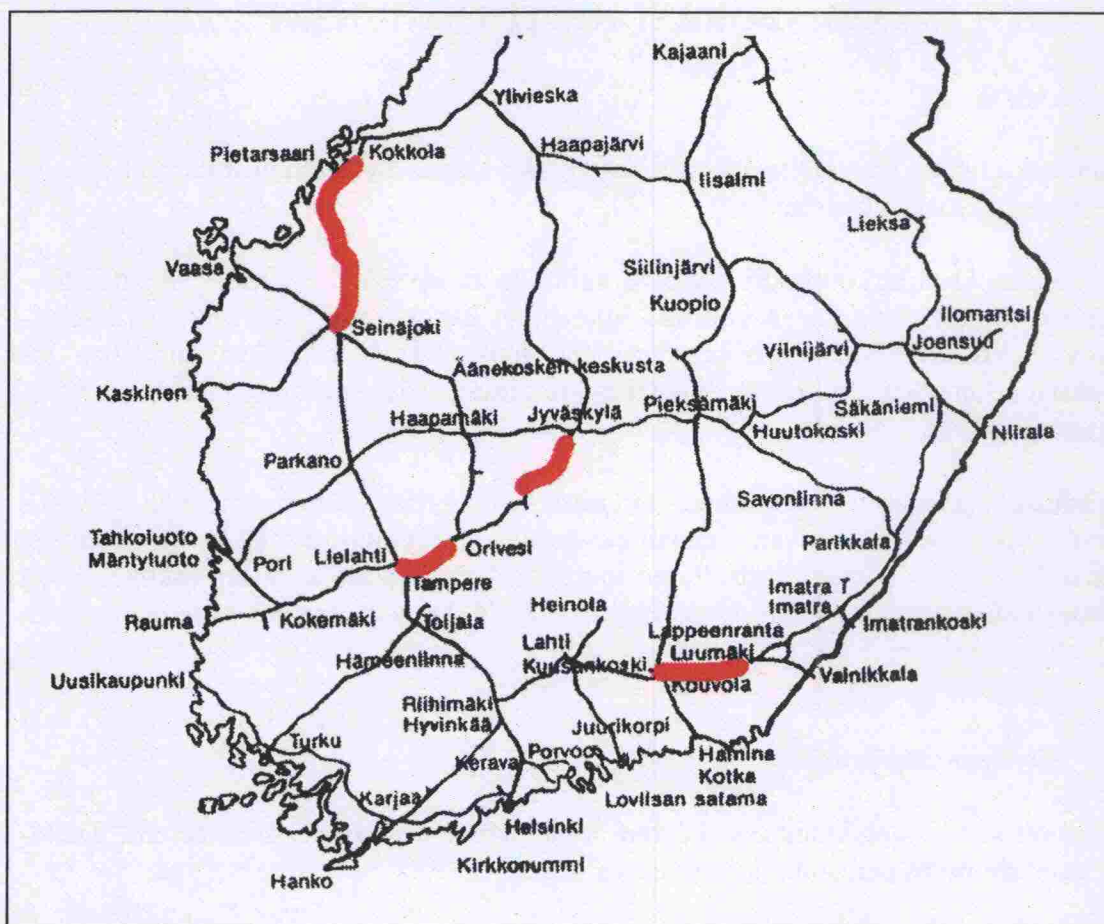
### 6.2 Näytteenotto-osuudet

Näytteenotto-osuuksien valinnassa käytettiin taulukossa 6.1 esitettyjä kriteereitä. Taulukosta nähdään myös perustelut kriteerien valintaan.

*Taulukko 6.1 Näytteenotto-osuuksien valintakriteerit ja niiden perustelut.*

| Kriteeri  | Perustelu   |
|---|---|
| Osuudella tehty rakeisuusluku tutkimus.                                   | Resurssien riittämättömyys kokonaisen rataosuuden rakeisuuslukujen määrittämiseen.                                |
| Tukikerrokseen kohdistunut kumulatiivinen liikennemäärä vähintään 50 MGT. | Hienoainesta on ennättänyt syntyä tukikerrokseen.   |
| Betoniratapölkkyosuus.  | Tulevaisuudessa pääasiallinen ratapölkky-materiaali. Luo ankarammat olosuhteet sepelille. Tulosten vertailtavuus. |

Taulukossa 5.1 on kriteerit täyttävät rataosuudet lihavoitu. Osuuksia oli neljä; Jämsänkoski – Jyväskylä, Seinäjoki – Kolppi, Kouvola – Luumäki ja Tampere – Orivesi, raide 1. Seinäjoki – Kolppi osuuden tarkastelu päätettiin jakaa kahteen osaan (Seinäjoki – Voltti ja Voltti – Kolppi), sillä rakeisuusluvuissa oli selvä muutos Voltin kohdalla. Kouvola – Luumäki osuudella tarkasteltiin kumpaakin raidetta erikseen. Näytteenotto-osuudet nähdään kuvasta 6.1.



Kuva 6.1 Rataverkkokuva näytteenotto-osuuksista.

Seuraavassa on esitetty näytteenotto-osuuksien taustoja ja käyttökokemuksia rata-alueilta saatujen tietojen mukaan.

#### Jämsänkoski – Jyväskylä

Rataosuus on melko uusi, sillä se on valmistunut vuonna 1977 oikaisemaan aiemmin Haapamäen kautta kulkenutta yhteyttä Tampereen ja Jyväskylän välillä. Kokemukset tukikerroksen toiminnasta ovat melko hyvät. Tukemistarve on ollut keskimääräinen muutamia ongelmakohtia lukuunottamatta. Sen sijaan ratapölkkyjen hajoaminen on ollut merkittävä ongelma. Viimeisen neljän vuoden aikana on vaihdettu 500-1000 rata-pölkkyä vuosittain.

Raidesepeli on peräisin tunneleista ja kalliroleikkauksista radan rakentamisen ajalta. Si-ten kiviaines on sekalaista ja koostuu Keski-Suomen granitoidikompleksille tyypillisistä kivilajeista, kuten graniitista, granodioriitista, gabrosta ja kiillegneisistä. Nykyisin tarvittava täydennyssepele tulee Muuramen Punakalliosta (R3). Vaativimpiin kohteisiin, kuten vaihteisiin ja silloille raidesepeli tuodaan Saarijärven Kolkanlahdesta (R1/R2).

Vuonna 1996 mitattu osuuden keskimääräinen rakeisuusluku oli 62, tukikerrokseen kohdistunut kumulatiivinen liikennemäärä 105 MGT ja SKI täten 22,3. Nykyinen vaatimus raidesepelille on R2.



## Seinäjoki – Kolppi

Rataosuus on osa päärataa ja on perusparannettu vuosina 1976-77, missä yhteydessä uusittiin myös tukikerros. Perusparannuksessa radan profiili nousi, sillä vanha tukikerros tasattiin uuden alle. Osalla rataosuudesta (n. 20 km) tukikerros puhdistettiin sepelinpuhdistuskoneella ja samalla asennettiin routalevyt. Mitatuissa rakeisuusluvuissa on havaittavissa selvä nousu siirryttäessä Voltista pohjoiseen. Syy tähän on selvä. Tällä kohtaa sijaitsee Seinäjoen ja Kokkolan kunnossapitoalueen raja. Rajan eteläpuolella raidesepeleli on peräisin pääosin Seinäjoen Routakalliosta. Osa pohjoispuolen raidesepeleistä saatiin perusparannuksen yhteydessä louhitusta Kovjoen oikaisusta ja osa tilattiin Pedersören, Pietarsaaren ja Kokkolan KTK:lta.

80-luvun alkupuolella otettiin täydennyssepeleliä monena vuonna Lepplaxin louhokselta 3000-10000 m<sup>3</sup> vuosittain Kokkolan kunnossapitoalueelle. Nykyisin täydennyssepeleli koko rataosuudelle tulee Routakalliosta, sillä Kokkolan seudulla ei vaatimusten mukaista kiviainesta ole saatavilla.

Kokemukset tukikerroksen osalta ovat Kokkolan kunnossapitoalueella huonot. Tukikerrosta on jouduttu uusimaan muutamien metrien - kymmenien metrien matkalta luke-mattomissa kohdissa. Ongelmallisimpia ovat olleet eristysjatkokset, ylikäytävät ja siltojen päät. Raidesepelelin on todettu kestävän puuratapölkyn alla, mutta betoniratapölkyn alla se jauhautuu nopeasti ja muuttuu sementtimäiseksi, kastuessaan erittäin kovaksi massaksi. Tästä syystä em. ongelmakohtiin on asennettu puuratapölkkyjä. Kokkolan kunnossapitoalueella tuetaan 1/3- 1/4 osuudesta vuosittain. Ongelmallisimmat kohdat jopa 3 kertaa vuodessa.

Myös Seinäjoen kunnossapitoalueella on jouduttu uusimaan tukikerrosta ylikäytävien, ja aivan viime vuosina myös eristysjatkoksien kohdilla. Ongelmat ovat kuitenkin vähäisempiä kuin pohjoisempana. Seinäjoen kunnossapitoalueella tuetaan vuosittain 20-25 km, mikä vastaa noin 1/4 osuudesta.

Vuonna 1995 Seinäjoki – Voltti osuudella mitattu keskimääräinen rakeisuusluku oli 48, kumulatiivinen liikennemäärä 141 MGT ja SKI 42,7. Vastaavat luvut Voltti- Kolppi osuudella olivat 88, 138 MGT ja SKI 18,9. Lujusvaatimus raidesepelelille on R1.

## Kouvola – Luumäki, molemmat raiteet 1 ja 2

Rataosuuden tukikerros on seulottu perusparannuksen yhteydessä vuosina 1989-92. Tällöin radan profiili ei paljoakaan muuttunut. Tukikerroksen ennen perusparannusta muodosti Hillosensalmen karkearakeinen graniitti, jonka karkeat rakeet palautettiin seulonnan jälkeen rataan. Ne muodostavat täten nykyisen tukikerroksen alaosan. Täydennyssepelelitarpeeksi jäi 700-900 l/m, mikä vastaa noin kolmannelta tukikerrosaineksesta. Täydennyssepeleliksi tuotiin Kerimäen Silvolasta tonaliittia.

Rata kulkee Salpausselän soramaastossa, joten pohjamaa on erittäin hyvää. Tukemistarve onkin ollut vähäinen, ainoastaan pieniä kallistumia on paikoin havaittu. Koska osuutta ei juurikaan ole tuettu, ei myöskään täydennyssepeleliä ole tarvittu. Nykyisin täydennyssepeleli tuodaan Koskenkylästä Tielaitoksen louhokselta.



Rataosuuden tarkastelun alainen betoniratapölkkyosuus on kilometrivälillä 196-238. Vuotuinen liikennemäärä on maamme suurin, vuonna 1998 pohjoisella raiteella 20,3 MGT ja eteläisellä raiteella 11,2 MGT, kun oletetaan liikenne oikeanpuoleiseksi. Siksi vaatimus raidesepelille on korkea, R1.

Rakeisuuslukututkimus on tehty vuonna 1996. Tuolloin eteläisen raiteen (raide 1) keskimääräiseksi rakeisuusluvuksi saatiin 34. Tukikerrokseen kohdistuneeksi liikennemääräksi laskettiin 54 MGT oikeanpuoleisen liikenteen oletuksella. SKI:ksi tuli täten 28,4. Pohjoisella raiteella (raide 2) rakeisuusluku oli 36, liikennemäärä 71 MGT ja SKI 33,8. On huomattava, että saman rataosuuden puuratapölkkyosuudella suorituskyskyindeksit olivat huomattavasti paremmat (vrt. taulukko 5.1). Rataosuudella on muista osuuksista poiketen tyypiltään 60 E1 kiskot.

#### Tampere – Orivesi, raide 1 (eteläinen)

Tukikerros on uusittu vuosina 1960-66. Tämän jälkeen näytteenottoajankohtaan (1996) saakka kertynyt kumulatiivinen liikennemäärä on 108 MGT. Rakeisuusluvun keskiarvo osuudella on 64 ja SKI siten 22.

Rataosuuden alkuperäinen raidesepeli on kokonaan Siitaman kivilouhimolta peräisin olevaa granodioriittia. Täydennyssepeliä on tuotu Siitaman lisäksi eri aikoina vaihtelevia määriä Sorilasta, Orivedeltä ja Valkeakoskelta. Syksyllä 1999 osuudelle vaihdettiin ratapölkkyt. Koska ratapölkynvaihto sekoittaa tukikerrosainesta tehtiin tämän tutkimuksen näytteenotto ennen ratapölkynvaihtoa.

### **6.3 Rakeisuusluvun määrittäminen**

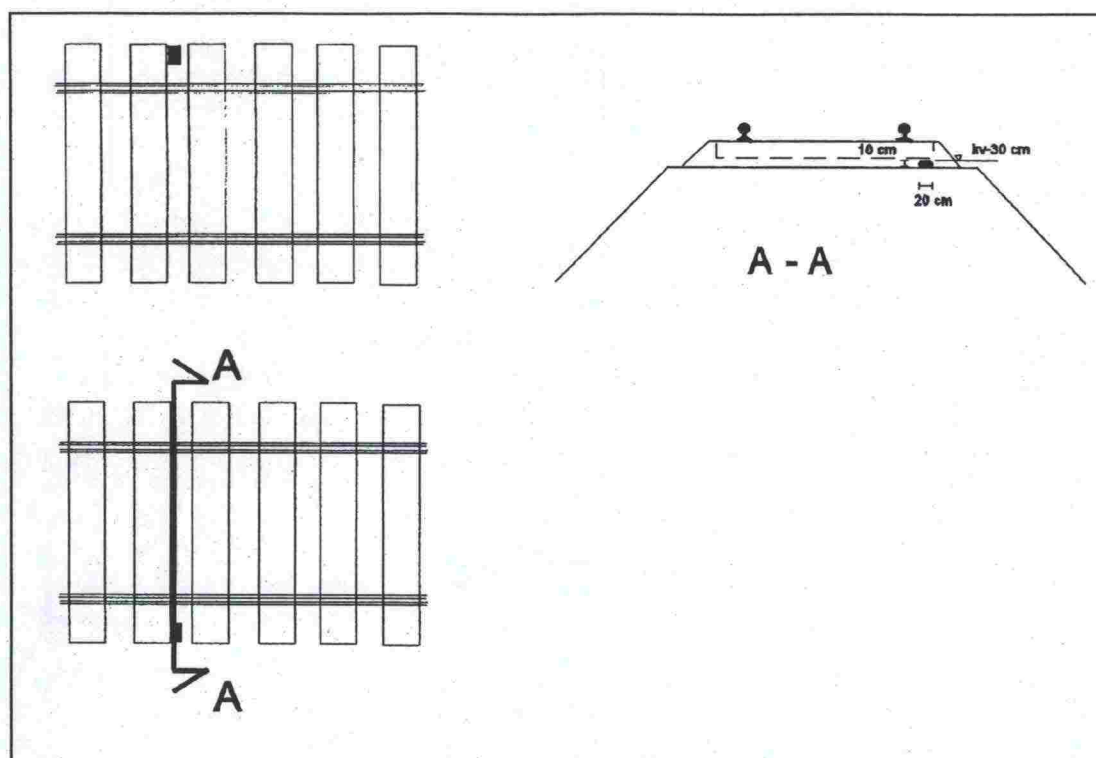
#### **6.3.1 Rakeisuusluvun näytteenotto**

Rakeisuusluvunäytteitä otettiin rakeisuuslukuseulontoja varten. Seulonnan tuloksista oli tarkoitus arvioida tukemisen vaikutusta hienoaineksen määrään sekä itse näytteenotto-menetelmän kelvollisuutta. Lisäksi liitteessä 1 esitetyn silmämääräisen arvioinnin yhteydessä otettiin rakeisuusluvunäytteitä vertailtavaksi tukikerroksen silmämääräisen arvion kanssa.

Rakeisuusluvunäytteenotto tehtiin sepelitukikerroksen laadun tutkimusohjeen [40] mukaisesti. Ainoastaan yksi näyte otettiin puuratapölkyn kohdalta (tukemisen vaikutuksen tutkimisen yhteydessä vähän tuetulta sillalta), joten muilla kohdilla käytettiin ohjeessa betoniratapölkylle määrättyä ottokohtaa (kuva 6.2).

Rakeisuusluvunäytettä otettaessa oli suurta huomiota kiinnitettävä siihen, että näytteenottosyvyys oli oikea, sillä korkeustasolla todettiin olevan erittäin suuri merkitys näytteen rakeisuuslukuun. Sama asia on todettu Turusen tutkimuksessa [56]. Varovaisuutta vaadittiin siinä, ettei kaivun yhteydessä näytteenottotasolle tai siltä pois varissut hienoainesta.





Kuva 6.2 Näytteenottokohta radassa betoniratapölkkyosuudella [40].

Ongelmallista oli myös näytteenoton aloitus- ja lopetustasojen säilyttäminen tasaisina siten, että näytteestä tuli edustava, sillä näytteenottosyvyydellä oli hienoaineksen lisäksi myös karkeita rakeita, joiden irrottamisen jälkeen näytteenottotasolle jäi kuoppa. Mikäli hienoainesta yritti kaapia kuopan alapintaan asti, tuli eteen varmasti uuden kuopan synnyttävä karkeampi rae. Yksittäinen näytteeseen mukaan otettu tai vastaavasti pois jätetty karkea rae voi vaikuttaa rakeisuuslukuun jopa 4 yksikköä, kun näytteen massa on ohjeen mukainen (6-8 kg).

Tukemisen vaikutusta hienoaineksen määrään arvioitiin Jämsänkoski - Jyväskylä osuudella. Siellä näytteitä otettiin viidestä paljon tuetusta ja viidestä vähän tuetusta kohdasta, joissa olosuhteet muutoin vastasivat mahdollisimman hyvin toisiaan (taulukko 6.2).

Tarkoituksena oli verrata runsaasti tuetuista ja vähän tuetuista kohdista otettujen näytteiden rakeisuuslukuja. Kustakin kymmenestä kohdasta otettiin kaksi rinnakkaisnäytettä vierekkäisistä pölkkyväleistä, jotta voitiin arvioida itse näytteenottomenetelmän kelvollisuutta rinnakkaisten näytteiden hajonnan avulla.

Taulukko 6.2 Rakeisuuslukuinäytteenottokohdat Jämsänkoski-Jyväskylä rataosuudella.

| Tyyppi       | Runsaasti tuettu kohta |                   | Vähän tuettu kohta |                    |
|--------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Silta        | km 325+744             | Uusipitkälä       | km 303+582         | Saajoki            |
| Sillan pää   | km 299+244             | Myllylampi, etelä | km 314+746         | Riitamaa           |
| Penger       | km 300+950             | Rasila            | km 314+610         | Korpilahti         |
| Tunnelin suu | km 315+994             | Sahinmäki, etelä  | km 308+160         | Lahdenvuori, etelä |
| Leikkaus     | km 288+400             | Jämsänkoski       | km 292+300         | Harjunkangas       |

Liitteenä olevan pölkynpää tutkimuksen yhteydessä otettiin yhdeksän rakeisuusluku-näytettä, joiden seulantatuloksia verrattiin hienoainespitoisuuden silmämääräiseen arvi-oon. Yhteensä rakeisuusluku näytteitä otettiin siten 29 kappaletta.

### 6.3.2 Rakeisuusluvun määrittäminen

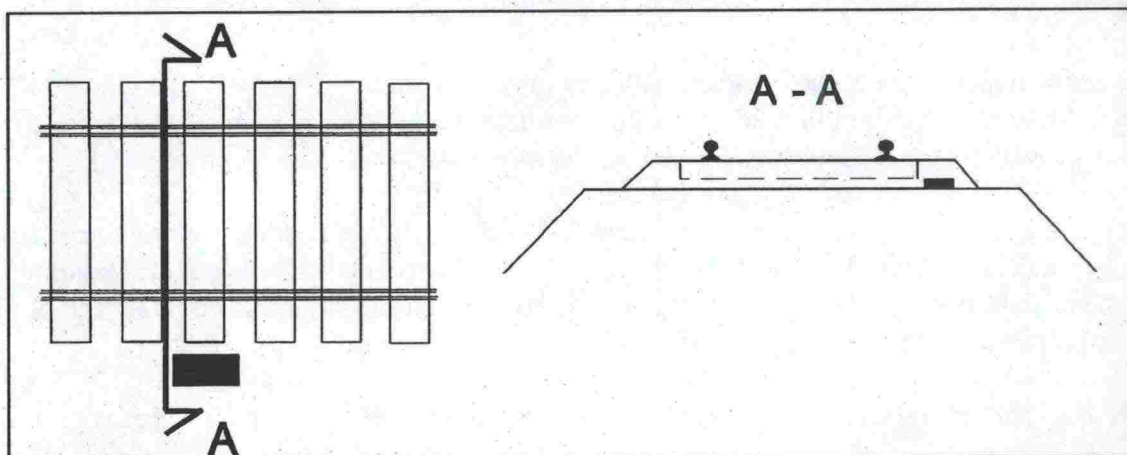
Rakeisuusluku määritettiin tukikerroksen laadun tutkimusohjeen [40] mukaisesti sillä erotuksella, että hienorakeinen aines seulottiin koneellisesti. Karkeammat rakeet sovi-tettiin käsin yksitellen seulan reikiin. Näytteet seulottiin seulasarjalla, joka sisälsi silmä-kooltaan 32, 25, 18, 13.2, 8, 4, 1, 0.5, 0.25, 0.125 ja 0.068 mm kudotut seulat. Näytteen rakeisuusluku laskettiin 25, 8 ja 1mm seulojen läpäisyprosenttien summana tutkimus-ohjeen mukaisesti.

## 6.4 Kiviaineksen lujuuden ja muodon arviointi

### 6.4.1 Lujuuskoe näytteenotto

Lujuuskoe näytteenotolla oli tarkoituksena selvittää valittujen rataosuuksien tukikerrok-sen pääkiviainekset sekä kerätä niitä lujuustestejä varten.

Ns. sekanäytteen massa vaihteli välillä 25 - 35 kg. Mikäli näyte sisälsi selvästi vain yhtä kivilajia, voitiin näyte jättää pienemmäksi. Näytteenottopaikka radassa on esitetty ku-vassa 6.3. Näyte otettiin pölkyn päästä sen alapinnan tasosta alaspäin. Näin toimittiin siksi, että koekaivausten perusteella voitiin todeta, että useimmissa tapauksissa tukiker-ros sisälsi useita eri kivilajeja, joita oli laitettu rataan eri aikoina. Em. kohdasta otetun näytteen arvioitiin edustavan parhaiten sitä kiviainesta, jonka suorituskykyä mitattu ra-keisuusluku kuvastaa. Täten radan pinnalle lisätty täydennysseveli tai tukemiskoneen hakkujen ratapölkyn alle työntämä seveli eivät päässeet vääristämään testituloksia.



Kuva 6.3 Lujuusnäytteen ottokohta radasta.

Sekanäytteitä otettiin kultakin rataosuudelta n. 8-12 km välimatkoin, jotta saataisiin kuva koko osuuden kiviaineksista, eri kivilajien keskinäisistä osuuksista sekä kiviainek-sen vaihteluista. Yhteensä sekanäytteitä otettiin 25 kappaletta.



Kivilajeista, joiden alkuperälouhoksesta saatiin varmuus (7 kpl), haettiin näytteet myös louhokselta tai kasasta. Lisäksi 5:stä kivilajista otettiin näyte radan pinnasta. Näin ollen otettuja näytteitä oli yhteensä 37 (taulukko 6.3).

*Taulukko 6.3 Otetut näytteet jaoteltuna rataosuuksittain seka-, louhos/kasa- ja radan pinnasta otettuihin näytteisiin.*

| Rataosuus                  | Sekanäyte (otto km) | Louhos / kasanäyte | Näyte radan pinnasta                 |
|----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Jämsänkoski-Jyväskylä      | 296+200             |                    |                                      |
|                            | 305+320             |                    |                                      |
|                            | 312+590             |                    |                                      |
|                            | 318+225             |                    |                                      |
|                            | 325+405             |                    |                                      |
| Seinäjoki-Voltti           | 428+000             | Routakallio        | Routakallion Plagiklaasiporfyyriitti |
|                            | 449+000             |                    |                                      |
|                            | 463+000             |                    |                                      |
|                            | 480+000             |                    |                                      |
| Voltti-Kolppi              | 495+000             | Kovjoen oikaisu    |                                      |
|                            | 506+000             |                    |                                      |
|                            | 510+000             |                    |                                      |
|                            | 518+000             |                    |                                      |
|                            | 529+000             |                    |                                      |
| Tampere-Orivesi, Eteläinen | 194+510             | Siitama            | Oriveden hapan vulkaniitti           |
|                            | 205+100             | Sorila             | Siitaman granodioriitti              |
|                            | 214+030             |                    |                                      |
| Kouvola-Luumäki, Eteläinen | 202+860             | Hiillosensalmi     | Kerimäen tonaliitti                  |
|                            | 208+720             | Kerimäki           | Täydennyssep. Graniittigneissi       |
|                            | 223+830             | Koskenkylä         |                                      |
|                            | 231+880             |                    |                                      |
| Kouvola-Luumäki, Pohjoinen | 202+860             |                    |                                      |
|                            | 208+720             |                    |                                      |
|                            | 223+830             |                    |                                      |
|                            | 231+880             |                    |                                      |
| Kaikki osuudet yhteensä    | 25                  | 7                  | 5                                    |

#### 6.4.2 Lujuuskokeet ja muotoarvon määritykset

Kohdassa 6.4.1 selostetulla tavalla otetut sekanäytteet seulottiin 25 mm seulalla. Koska sepelirakeet pyöristyvät radassa kuormituksen alaisena, ei alle 25 mm rakeita kelpuutettu lujuuskokeisiin. Tämä raekoko on lähellä testeissä käytettävää 8-13.2 mm eikä murskauksessa synny riittävästi uusia teräviä lohkopintoja, jolloin valmiiksi pyöristyneet rakeet selviäisivät testeistä vääristävän hyvin.

Seulalle jäänyt aines lajiteltiin eri kivilajeihin. Lujuuskokeet tehtiin erikseen kustakin lajitellusta kivilajista. Poikkeuksen tästä muodostavat Jämsänkoski – Jyväskylä osuudelta otetut sekanäytteet, joiden lajittelu oli mahdotonta, koska ne sisälsivät hyvin monia eri kivilajeja. Näiden näytteiden osalta lujuuskokeet tehtiin 25 mm seulalle jääneestä sekalaatuisesta aineksesta.

Radan pinnalta, louhoksilta ja kasoista otetut näytteet soveltuivat sellaisenaan lujuuskokeisiin. Lujuuskokeet tehtiin yhteensä 25 kiviainekselle taulukon 6.4 mukaisesti.

Taulukko 6.4 Lujuuskoenäytteet lajiteltuna tyypeittäin.

| Näytetyyppi                             | Määrä |
|---|-------|
| Sekanäyte (Jämsänkoski-Jyväskylä osuus) | 5     |
| Sekanäytteestä lajiteltu näyte          | 8     |
| Näyte louhokselta / kasasta             | 7     |
| Näyte radan pinnasta                    | 5     |
| Näytteet lujuuskokeisiin yhteensä       | 25    |

Lujuuskokeina tehtiin raidesepeliluokan määräävät haurausarvo- ja kuulamylykokeet. Kiviaineksen murskattiin kaksivaihemurskauksena, jonka toisessa vaiheessa syöttö oli tukahduttava. Näin toimittiin, koska murskausvaiheiden määrän on todettu vaikuttavan merkittävästi rakeiden muotoarvoon ja siten myös koetuloksiin [58].

Kokeet tehtiin RHK:n ohjeen [60] mukaisina. Kumpaankin kokeeseen sisältyy murskatun materiaalin muotoarvon mittausta. Kiviainesmateriaalin muotoarvoa arvioitiin myös murskatulle materiaalille tehdyllä litteyslukumäärityksellä [51].

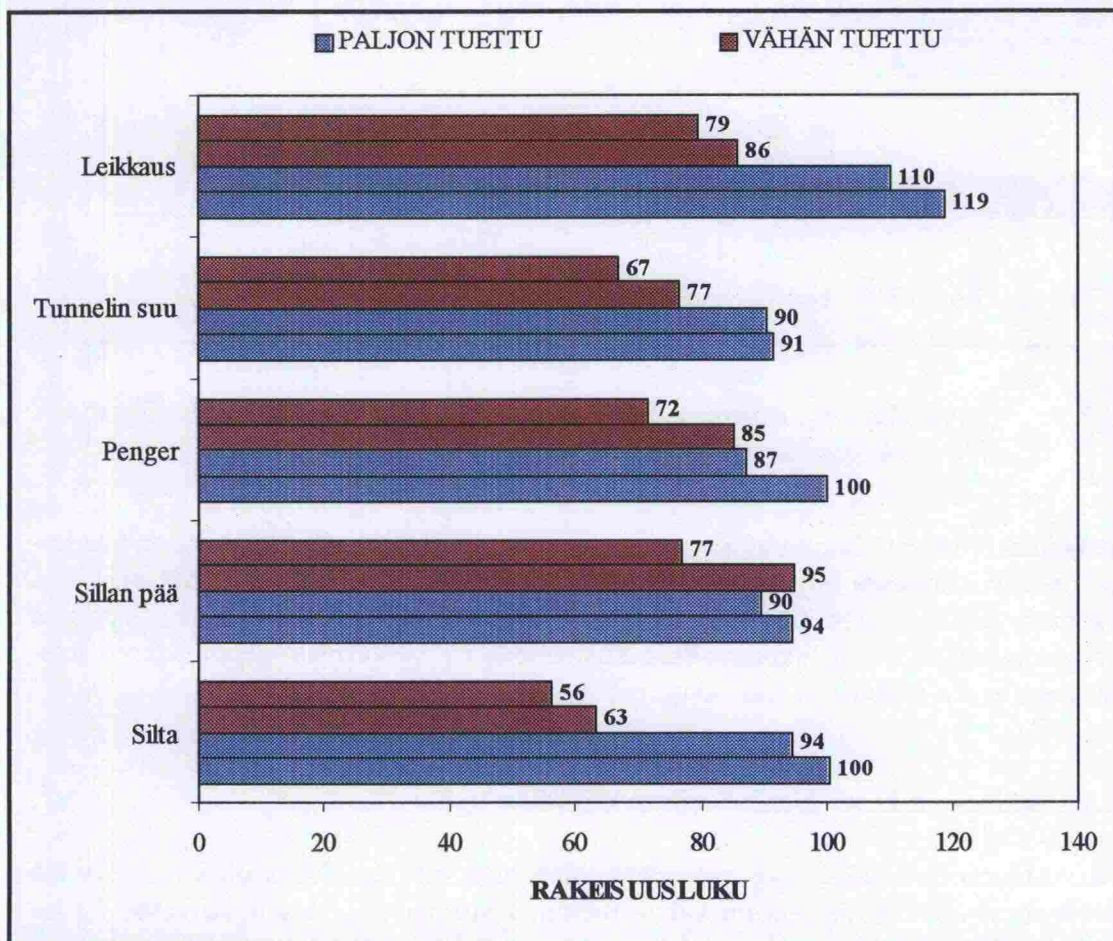


## 7. KOETULOKSET

### 7.1 Rakeisuuslukututkimus

#### 7.1.1 Mitatut rakeisuusluvut

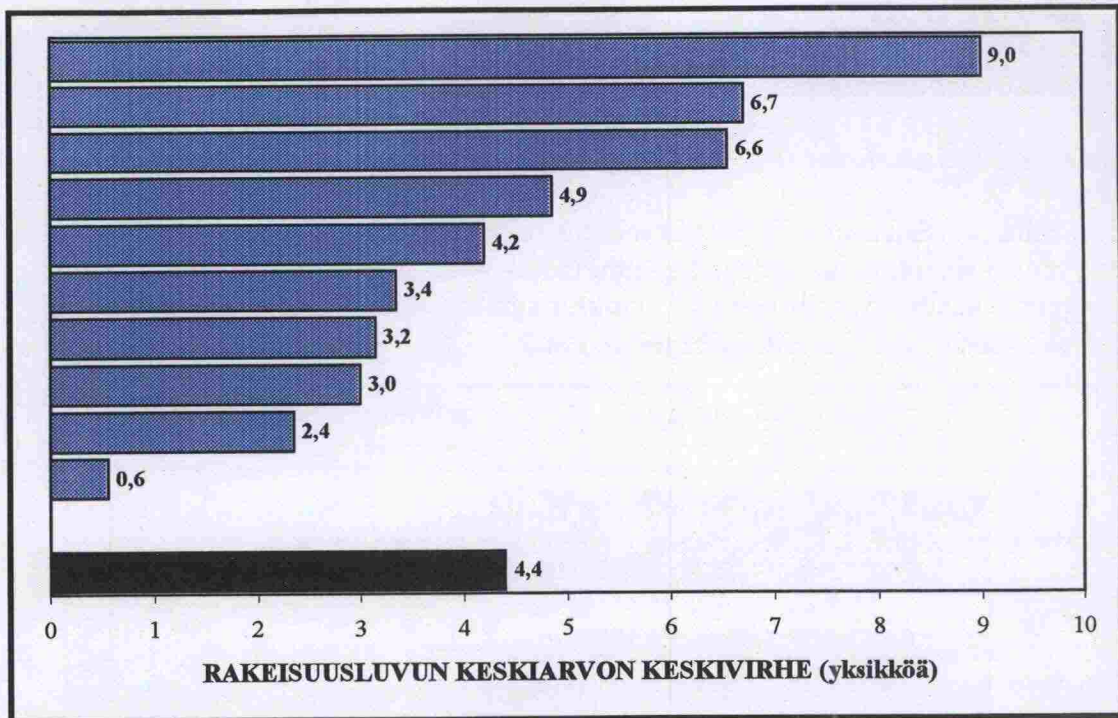
Rataosuudelta Jämsänkoski – Jyväskylä mitatut rakeisuusluvut on esitetty kuvassa 7.1. Kohdetyyppien sijainti rataosuudella käy ilmi taulukosta 6.2. Tarkemmat seulontatulokset ja rakeisuuskäyrät ovat liitteessä 2. Tulokset silmämääräisen arvion yhteydessä mitatuista rakeisuusluvuista on esitetty liitteissä 1 ja 2.



Kuva 7.1 Mitatut rakeisuusluvut eri kohdetyypeissä.

#### 7.1.2 Näytteenottomenetelmän luotettavuus

Näytteenottomenetelmän luotettavuutta arvioitiin rinnakkaisten, vierekkäisistä pölkkyväleistä mitattujen rakeisuuslukujen (kuvassa 7.1 päällekkäiset saman väriset palkit) keskiarvon keskivirheiden pohjalta. Keskivirheet vaihtelivat välillä 0,6 - 9,0 (kuva 7.2). Keskimääräiseksi rakeisuusluvun keskivirheeksi saatiin 4,4, mikä oli oletettua pienempi ottaen huomioon, että yksittäinen karkea rae saattaa vaikuttaa rakeisuuslukuun jopa 4 yksikköä.



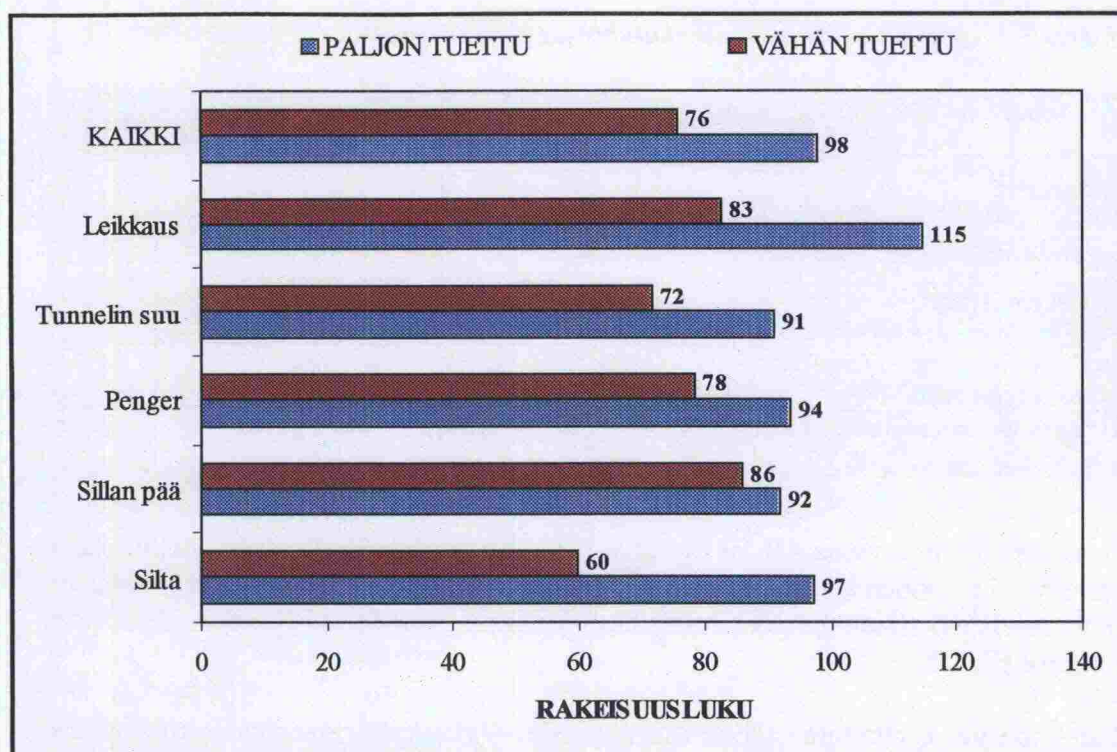
*Kuva 7.2 Rinnakkaisten rakeisuuslukujen keskiarvojen keskivirheet. Musta palkki kuvaa keskimääräistä virhettä.*

Pienestä keskivirheestä huolimatta on huomattava, että suurin ero vierekkäisten pölkkyvälien rakeisuusluvuissa oli 18 yksikköä. Saatujen kokemusten nojalla voidaan sanoa menetelmän olevan hyvin arka näytteenottotason vaihteluille. Näytteenottosyvyys on aina syytä mitata. Lisäksi tukikerroksen kosteudella on vaikutusta hienoaineksen irrottavuuteen ja siten näytteen edustavuuteen.

### **7.1.3 Tukemisen vaikutus hienoaineksen määrään**

Runsaasti tuetuista kohdista otettujen näytteiden hienoainespitoisuus oli kunkin viiden kohdetyypin osalta suurempi kuin vähän tuettujen kohtien näytteiden. Kuvassa 7.3 on kahden rinnakkaisnäytteen rakeisuusluvuista lasketut keskiarvot kussakin kohdetyypissä. Kuvan ylimmäinen palkkipari kuvaa kaikkien kohdetyyppien keskiarvoa.





Kuva 7.3 Rinnakkaisnäytteiden rakeisuuslukujen keskiarvot eri kohdetyypeissä paljon ja vähän tuetuissa kohdissa.

Rata-alueelta saadun arvion mukaan koko rataosuus tuettiin aluksi 3 kertaa ensimmäisen 1,5 vuoden aikana vuosina 1977-78. Runsaasti tuettuja kohteita on tuettu alkutuennan lisäksi keskimäärin 1,5 kertaa vuodessa ja vähän tuettuja kohteita alkutuennan lisäksi kerran viidessä vuodessa. Näillä arvioilla saadaan tukemismääräksi näytteenottoajan kohtaan eli kesään 1999 mennessä runsaasti tuetuille kohdille 34 ja vähän tuetuille kohdille 7 kertaa. Jos paljon - ja vähän tuettujen kohtien ero rakeisuusluvussa oletetaan kokonaan tukemisesta aiheutuneeksi, voidaan yhden tukemiskerran sanoa kasvattaneen rakeisuuslukua keskimäärin 0,8:lla. Tällä oletuksella saadaan tukemisen vaikutukseksi rakeisuuslukuun 28 yksikköä runsaasti tuetuilla osuuksilla ja 6 yksikköä vähän tuetuilla osuuksilla, mitkä vastaavat 28 % ja 8 % rakeisuusluvuista (taulukko 7.1). Kiviaineksen keskimääräiset lujuusarvot (ks. 7.2.1) rataosuudella eivät aivan täyttäneet luokan R4 vaatimusta.

On kuitenkin muistettava, että kuten kappaleessa 5.4.2 todettiin, hienoineksen synty tukemisen yhteydessä vähenee, kun tukemismäärät lisääntyvät ja kiviaineksen muoto paranee. Voidaankin olettaa, että radan asettumisen vaatima tuenta, mikä tehtiin koko rataosuudelle heti rakentamisen jälkeen on synnyttänyt hienoinesta keskimääräistä tukemiskertaa enemmän ja tukemisen vaikutus rakeisuuslukuun on vielä em. suurempi.



Taulukko 7.1 Arviointi tukemisen vaikutuksesta rakeisuushukuun.

| Jämsänkoski-Jyväskylä<br>1977-1996                                  | Runsaasti tuettu kohta | Vähän tuettu kohta | Ero |
|---|------------------------|--------------------|-----|
| Tukemismäärä  | 34                     | 7                  | 27  |
| Rakeisuushuvun keskiarvo  | 98                     | 76                 | 22  |
| Yhden tukemiskerran aiheuttama<br>lisäys rakeisuushukuun (yksikköä) | 0,8                    | 0,8                |     |
| Tukemisen kokonaisvaikutus rakei-<br>suushukuun (yksikköä)          | 28                     | 6                  |     |
| Tukemisen kokonaisvaikutus rakei-<br>suushukuun (%)                 | 28                     | 8                  | 20  |

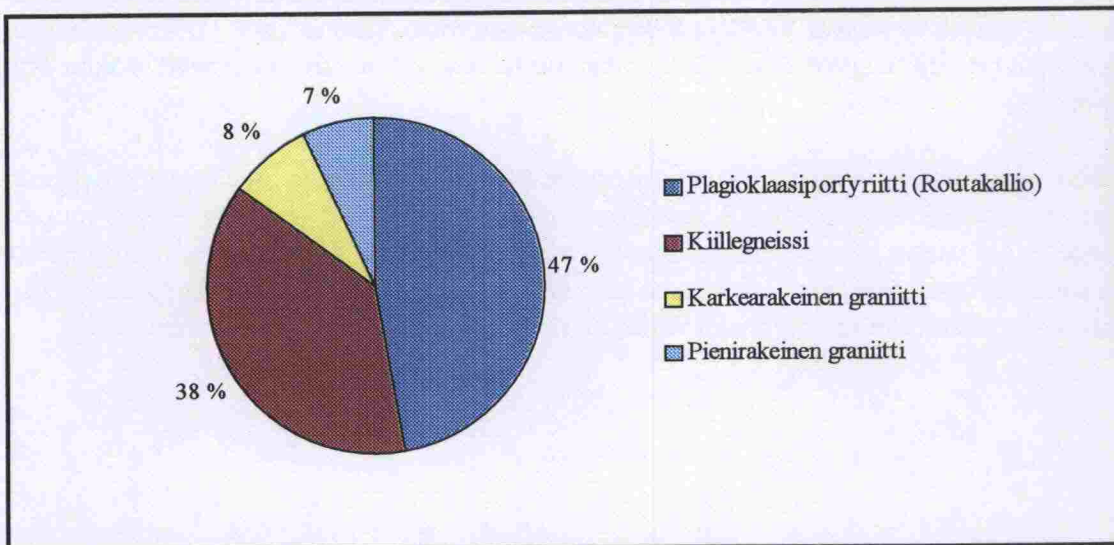
Tulos vastaa hyvin luvussa 4.3.10 esiteltyä BR:n tutkimusta [50], jossa todettiin 22 puristuskerran 15 vuoden aikana synnyttäneen 20 % kaikesta hienoaineksesta. Vastaavuus on hyvä myös pykälässä 4.3.10 kuvattuihin Uusi-Luomalahden [57] tutkimuksessa saatuihin tuloksiin.

Todettakoon vielä, että tarkastellun Jämsänkoski - Jyväskylä rataosuuden tukemismäärät ovat tavanomaisia ainakin Jyväskylän rata-alueella.

## 7.2 Lujuustutkimus

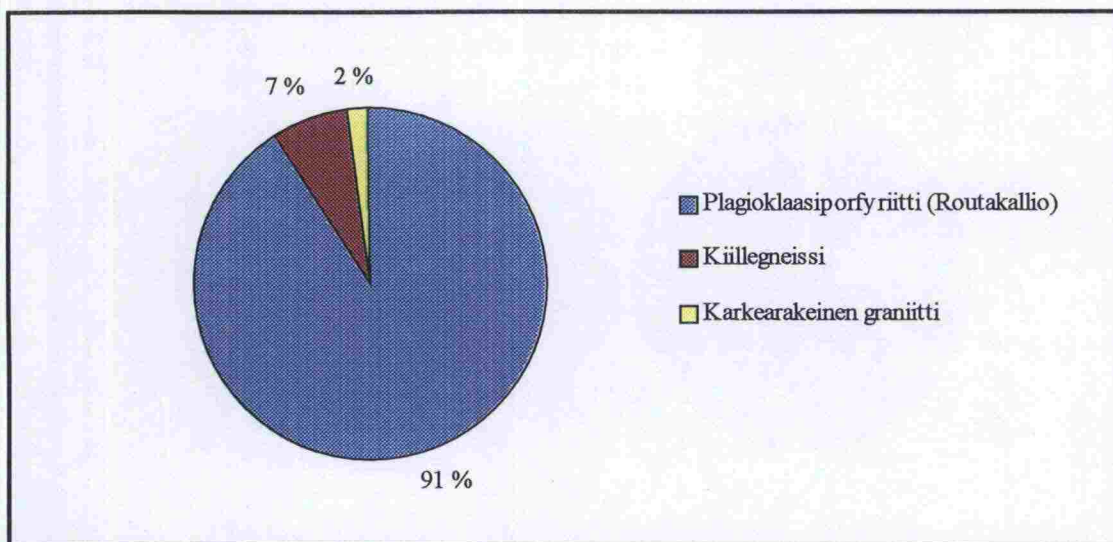
### 7.2.1 Lujuus- ja muotoarvotulokset

Sekanäytteiden lajittelun tuloksena saadut eri kivilajien osuudet tutkituissa näytteissä on esitetty liitteessä 3. Näiden perusteella on kuviin 7.4 - 7.8 laskettu kivilajien osuudet rataosuuksilla keskimäärin. Liitteen 3 taulukosta nähdään, että Seinäjoki - Kolppi osuudella pääkiviaineksen, plagioklaasiporfyyriitin, osuus muuttuu suunnilleen Voltin, eli kilometrin 490 kohdalla, kuten rakeisuushuvuissa tällä kohtaa tapahtuvan selvän muutoksen sekä rata-alueilta saatujen tietojen pohjalta saattoi odottaa.

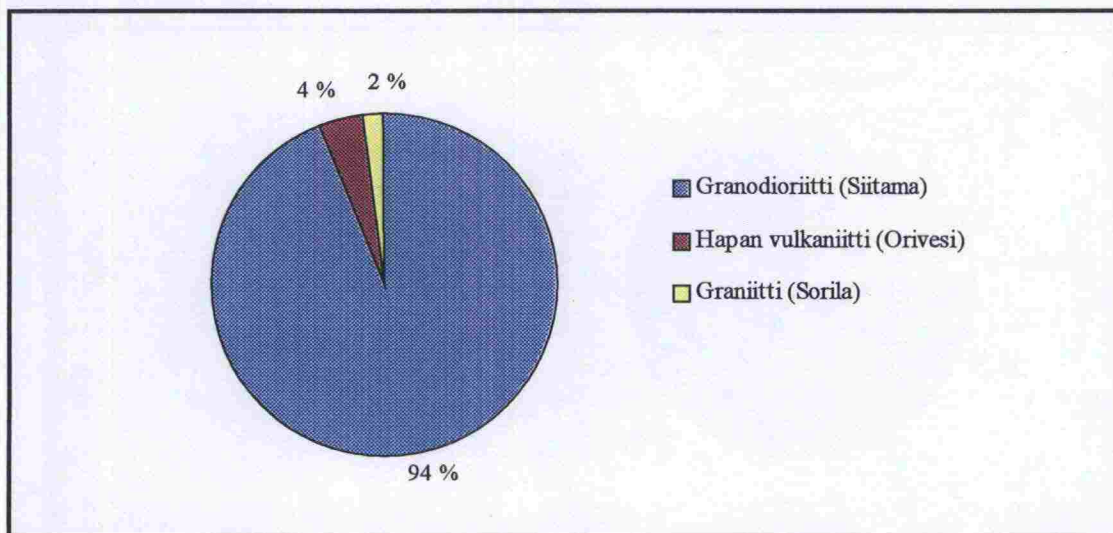


Kuva 7.4. Valtti -Kolppi rataosuuden kivilajit.

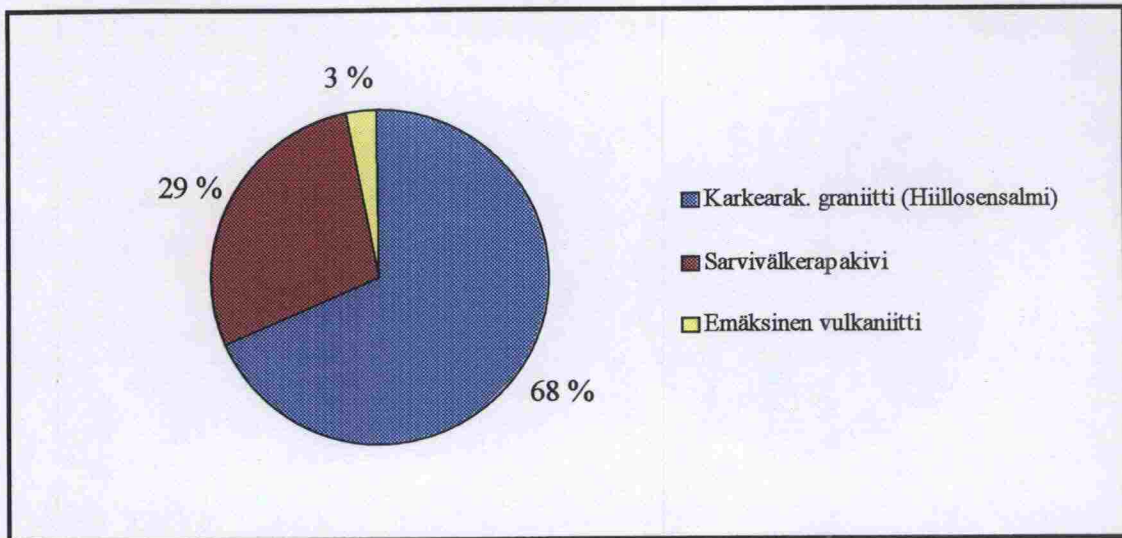




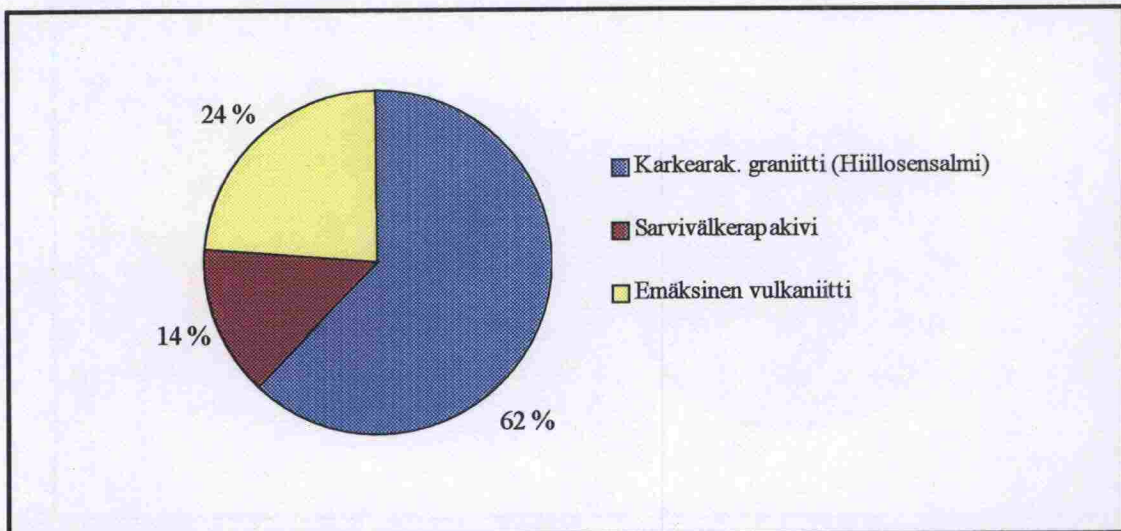
Kuva 7.5 Seinäjoki-Voltti rataosuuden kivilajit.



Kuva 7.6 Tampere-Orivesi rataosuuden raiteen 1 kivilajit.



Kuva 7.7 Kouvola-Luumäki rataosuuden raiteen 1 kivilajit.



Kuva 7.8 Kouvola-Luumäki rataosuuden raiteen 2 kivilajit.

Kullekin kiviainekselle tehtyjen lujuuskokeiden sekä kiviainesmateriaalin muotomäärittelyn tulokset on koottu taulukkoon 7.2. Litteysluku on määritetty murskatusta aineksesta ja kuvaa siten raaka-aineen, ei sepelituotteen muoto-ominaisuuksia. FM Pasi Niskanen on kuvannut kivilajien mineralogiaa ja rapautumisalttiutta ohuthietutkimuksissa liitteessä 4.

Lujuuskokeiden tulosten pohjalta on kullekin rataosuudelle laskettu kivilajien osuuksia painottaen taulukon 7.3 mukaiset keskimääräiset lujuusarvot. On syytä huomata, että kullakin rataosuudella raidesepelin luokka on selvästi osuuden nykyvaatimuksia alhaisempi. Ainoastaan Seinäjoki – Kolppi osuuden sepeli ylittää nykyluokituksen alimman tason R4, mutta sielläkään ei päästä lähellekään vaatimustasoa, joka on R1.



Taulukko 7.2 Kootut lujuuskoetulokset ja muotoarvot.

| Rataosuus /<br>Kivilaji          | Näytetyyppi *)   |                  |                  |                  |                  | Omi-<br>naispal-<br>no<br>( t/m3) | Hauraus<br>arvo<br>(HA) | Kuula-<br>mylly-<br>arvo<br>(KM) | Raide-<br>sepe-<br>li-<br>luokka<br>(HA/KM) | Puikkoisuus<br>* <sub>2</sub> )<br>(HA / KM) | Litteys-<br>luku<br>(8-20mm<br>aines) |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|--|---------------------------------------|
|                                  | L<br>a<br>j<br>i | P<br>i<br>n<br>t | L<br>o<br>u<br>h | K<br>a<br>s<br>a | S<br>e<br>k<br>a |                                   |                         |                                  |   |  |                                       |
| Seinäjoki-Kolppi                 |                  |                  |                  |                  |                  |                                   |                         |                                  |   |  |                                       |
| Porfyriitti                      | X                |                  |                  |                  |                  | 2,80                              | 10,9                    | 12,1                             | R3 / R4                                     | 2,09 V / 2,06                                | 7,3                                   |
| Porfyriitti                      |                  | X                |                  |                  |                  | 2,77                              | 12,4                    | 9,1                              | R3 / R2                                     | 2,38 V / 2,37                                | 15,2                                  |
| Porfyriitti (Routakallio)        |                  |                  | X                |                  |                  | 2,78                              | 10,8                    | 11,2                             | R2 / R3                                     | 2,15 / 2,06                                  | 5,4                                   |
| Kiillegneissi                    | X                |                  |                  |                  |                  | 2,75                              | 16,7                    | 18,0                             | R4 / --                                     | 2,29 / 2,10                                  | 4,5                                   |
| Tonaliitti (Kovjoen oikaisu)     |                  |                  | X                |                  |                  | 2,71                              | 19,4                    | 18,6                             | -- / --                                     | 2,13 / 2,11                                  | 10,1                                  |
| Pienirakeinen graniitti          | X                |                  |                  |                  |                  | 2,67                              | 15,8                    | 13,0                             | R4 / R4                                     | 2,13 / 2,02                                  | 10,7                                  |
| Karkearakeinen graniitti         | X                |                  |                  |                  |                  | 2,72                              | 17,2                    | 10,1                             | R4 / R4                                     | 2,15 / 1,84                                  | 6,9                                   |
| Kouvola-Luumäki                  |                  |                  |                  |                  |                  |                                   |                         |                                  |   |  |                                       |
| Karkearakeinen graniitti         | X                |                  |                  |                  |                  | 2,65                              | 27,1                    | 16,7                             | -- / --                                     | 2,07 / 1,85                                  | 6,4                                   |
| Kark.rak. gran. (Hiillosensalmi) |                  |                  | X                |                  |                  | 2,62                              | 26,9                    | 16,3                             | -- / --                                     | 1,99 / 1,84                                  | 2,5                                   |
| Tonaliitti                       |                  | X                |                  |                  |                  | 2,71                              | 13,4                    | 9,4                              | R3 / R2                                     | 2,10 V / 2,19                                | 12,4                                  |
| Tonaliitti (Kerimäki)            |                  |                  |                  | X                |                  | 2,71                              | 14,8                    | 9,2                              | R4 / R3                                     | 2,05 V / 1,97                                | 2,5                                   |
| Graniittigneissi                 |                  | X                |                  |                  |                  | 2,72                              | 18,4                    | 17,7                             | -- / --                                     | 2,21 / 1,99                                  | 6,8                                   |
| Sarvivälkerapakivi               | X                |                  |                  |                  |                  | 2,73                              | 18,5                    | 13,0                             | -- / --                                     | 2,01 V / 1,88                                | 7,4                                   |
| Emäksinen vulkaniitti            | X                |                  |                  |                  |                  | 2,76                              | 10,8                    | 7,6                              | R3 / R1                                     | 2,09 V / 2,14                                | 7,1                                   |
| Tonaliitti (Koskenkylä)          |                  |                  | X                |                  |                  | 2,67                              | 9,3                     | 6,3                              | R1 / R1                                     | 2,19 / 2,23                                  | 5,9                                   |
| Jämsänkoski-Jyväskylä            |                  |                  |                  |                  |                  |                                   |                         |                                  |   |  |                                       |
| km 296+200                       |                  |                  |                  |                  | X                | 2,74                              | 20,3                    | 13,4                             | -- / --                                     | 2,23 / 1,95                                  | 6,0                                   |
| km 305+320                       |                  |                  |                  |                  | X                | 2,73                              | 18,4                    | 10,1                             | -- / R4                                     | 2,15 / 1,92                                  | 6,0                                   |
| km 312+590                       |                  |                  |                  |                  | X                | 2,70                              | 19,8                    | 13,0                             | -- / --                                     | 2,15 / 1,97                                  | 4,1                                   |
| km 318+225                       |                  |                  |                  |                  | X                | 2,84                              | 17,4                    | 13,4                             | -- / --                                     | 2,13 / 1,89                                  | 4,5                                   |
| km 325+405                       |                  |                  |                  |                  | X                | 2,90                              | 17,0                    | 15,1                             | -- / --                                     | 2,01 / 1,93                                  | 3,6                                   |
| Tampere-Orivesi                  |                  |                  |                  |                  |                  |                                   |                         |                                  |   |  |                                       |
| Granodioriitti                   | X                |                  |                  |                  |                  | 2,70                              | 22,5                    | 15,8                             | -- / --                                     | 2,14 / 1,83                                  | 5,3                                   |
| Granodioriitti                   |                  | X                |                  |                  |                  | 2,69                              | 21,5                    | 15,2                             | -- / --                                     | 2,18 / 1,95                                  | 4,4                                   |
| Granodioriitti (Siitama)         |                  |                  | X                |                  |                  | 2,67                              | 23,6                    | 15,8                             | -- / --                                     | 2,04 / 1,84                                  | 2,9                                   |
| Hapan vulkaniitti                |                  | X                |                  |                  |                  | 2,77                              | 8,9                     | 10,9                             | R1 / R3                                     | 2,37 V / 2,69                                | 17,4                                  |
| Graniitti (Sorila)               |                  |                  | X                |                  |                  | 2,68                              | 15,4                    | 10,3                             | R4 /R3                                      | 2,27 / 2,03                                  | 6,7                                   |

\*<sub>1</sub>) Näytetyyppien lyhenteet: Laji = sekanäytteestä lajiteltu yhden kivilajin näyte; Pint = radan pin-  
nasta otettu yhden kivilajin näyte; Louh = louhokselta haettu näyte; Kasa = murskatusta kasasta otettu  
näyte; Seka = tukikerroksesta otettu sekanäyte.

\*<sub>2</sub>) V luvun perässä kuvastaa, että puikkoisuus on määritetty välpätystä näytteestä.

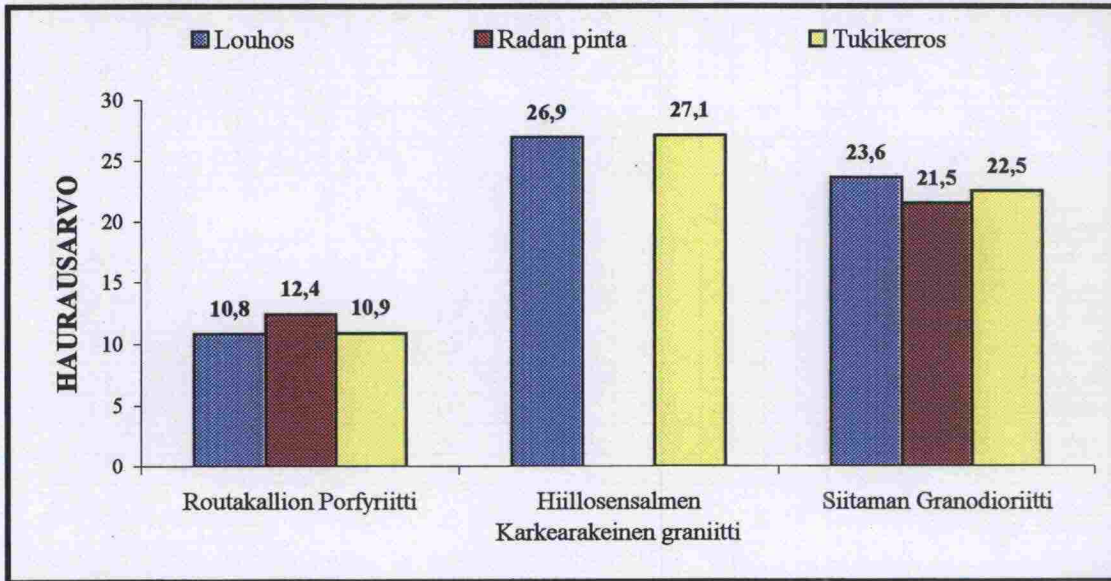
Taulukko 7.3 Rataosuuksien keskimääräiset lujuus- ja muotoarvot.

| Rataosuus              | Hauraus<br>Arvo | Kuulamyly<br>Arvo | Puikkol-<br>suus (HA) | Puikkol-<br>suus (KM) | Raidesepeli<br>luokka | Nyky-<br>vaatimus | Litteysluku<br>8-20 mm |
|------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|
| Voltti-Kolppi          | 14,2            | 13,6              | 2,23                  | 2,10                  | R3 / R4               | R1                | 8,3                    |
| Seinäjoki-Voltti       | 11,9            | 11,3              | 2,21                  | 2,15                  | R2 / R3               | R1                | 10,7                   |
| Kouvola-Luumäki, 1 (E) | 24,3            | 15,4              | 2,05                  | 1,88                  | -- / --               | R1                | 5,4                    |
| Kouvola-Luumäki, 2 (P) | 21,9            | 13,9              | 2,04                  | 1,92                  | -- / --               | R1                | 5,5                    |
| Jämsänkoski-Jyväskylä  | 18,6            | 13,0              | 2,13                  | 1,93                  | -- / --               | R2                | 4,8                    |
| Tampere-Orivesi        | 21,8            | 15,3              | 2,13                  | 1,91                  | -- / --               | R3                | 4,8                    |

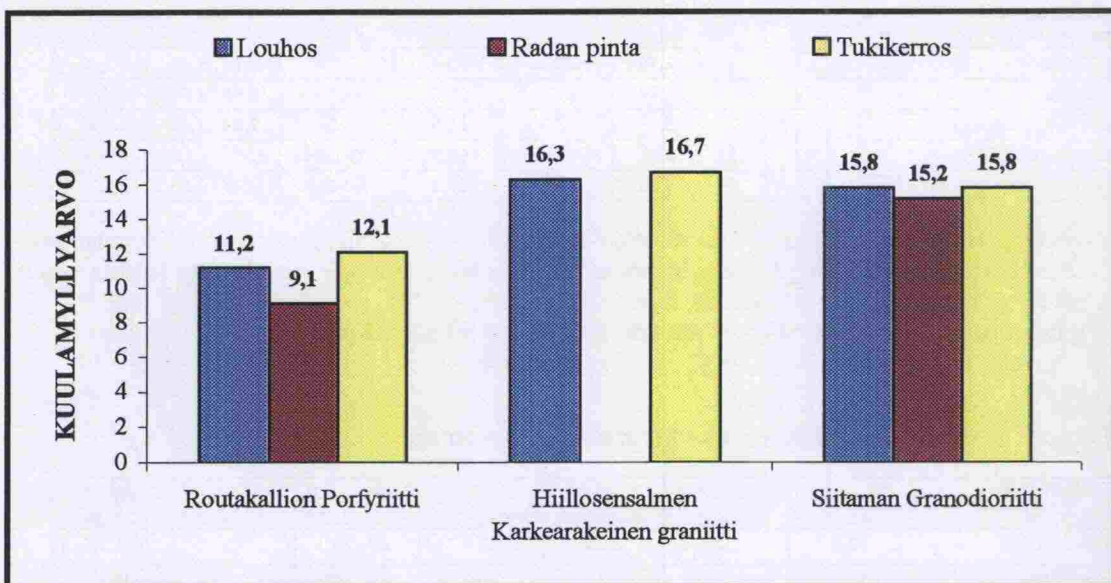


### 7.2.2 Louhokselta ja radasta otetun näytteen lujuusero

Verrattaessa kiviaineksen lujuutta louhokselta, radan pinnasta ja syvältä tukikerroksesta otettujen näytteiden välillä havaitaan, että erot ovat varsin pieniä (kuvat 7.9, 7.10). Routakallion porfyriitin osalta radan pinnasta otetun näytteen lujuusarvojen lievä ero louhokselta ja tukikerroksesta otettuihin nähden on selitettävissä sillä, että Routakallio jakautuu kahteen pääkomponenttiin [61].



Kuva 7.9 Erot haurausarvoissa louhokselta, radan pinnasta ja syvältä tukikerroksesta otetun näytteen välillä.



Kuva 7.10 Erot kuulamylllyarvoissa louhokselta, radan pinnasta ja syvältä tukikerroksesta otetun näytteen välillä.

Tulosten pohjalta voidaan sanoa kyseisten kivilajien olevan rapautumattomia, koska radassaoloaika ei ole vaikuttanut niiden lujuuteen. Turusen [56] tutkimuksessa havaittiin tietyillä kivilajeilla eroja tukikerroksesta ja louhokselta määritettyjen haurausarvojen välillä, jota selitettiin rapautumisella sekä hauraan aineksen pois kulumisella liikenne-

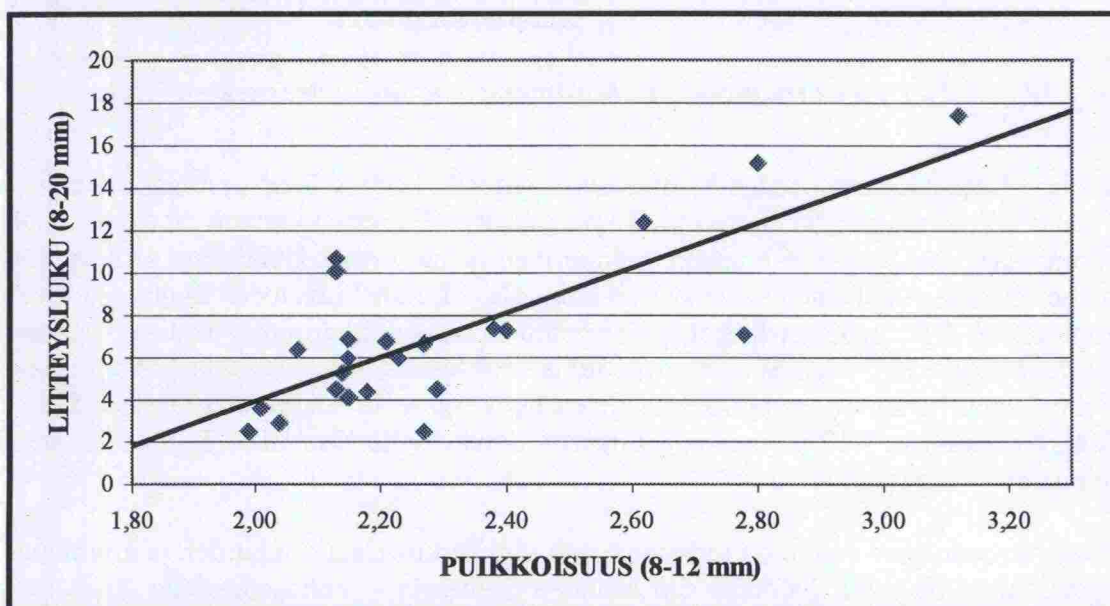


kuormituksen johdosta. Tutkimuksesta ei kuitenkaan käy ilmi, tehtiinkö radasta otettujen näytteiden haurausarvokokeet testattavaan raekokoon jauhautuneesta vai murskatusta aineksesta, mikä varmasti vaikuttaa tulokseen.

Kuvien 7.9 ja 7.10 perusteella myös radan pinnasta tai syvemmältä tukikerroksesta otetun näytteen testaamisella saadaan käsitys raideseppelin lujuudesta. Mikäli kiviaines on rapautumiselle altista kuvaa em. näytteiden lujuus raideseppelin senhetkistä, heikentyntä lujuutta.

### 7.2.3 Muotoarvon määrittämenetelmien korrelaatio

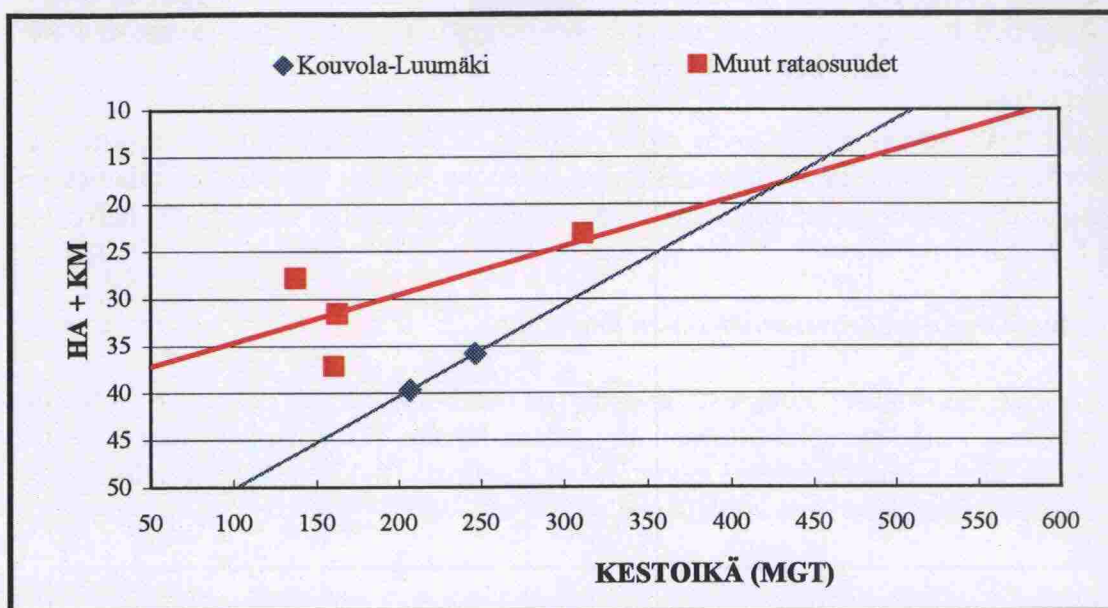
Vertailtaessa murskatusta aineksesta määritettyä puikkoisuutta, eli pisimmän ja lyhimmän dimension suhdetta sekä litteyslukua saadaan kuvan 7.11 mukainen yhteys. Puikkoisuus on mitattu haurausarvossa käytettävästä fraktiosta (8-12 mm) ja litteysluku 8-20 mm raekoosta. Vastaavuus on kohtalainen.



Kuva 7.11 Murskatusta aineksesta mitatun puikkoisuuden ja litteysluvun vertailu.

### 7.2.4 Raideseppelin laadun yhteys kestoikään

Kun verrataan taulukon 7.3 rataosuuksien keskimääräisiä lujuuksia kohdassa 5.4.3 (taulukko 5.2) rataosuuksille arvioituihin kestoikiin, saadaan kuvan 7.12 mukainen riippuvuus. Kuvassa kiviaineksen lujuutta on valittu kuvaamaan haurausarvon ja kuulamylyarvon summa. Mitä pienempi on em. summa, sitä lujempi on kiviaines.



Kuva 7.12 Tutkittujen rataosuuksien kiviaineksen lujuus suhteessa kestoikään.

Kouvola – Luumäki rataosuuden kummallakin raiteella kiviaineksen kestoikä on lujuuteen nähden muita osuuksia suurempi. Tämä selittyy sillä, että kyseinen rataosuus kulkee soramaastossa, jolloin pohjamaan painuminen ja sen myötä kiviainesta särkevä tukeminen on vähäistä. Toinen selvä syy on Kouvola – Luumäki osuuden muita osuuksia jäykemmät 60 E1- tyyppiset kiskot, joista johtuen liikennekuormitus jakautuu useammalle ratapölkylle ja pienentää siten myös tukikerroksessa vallitsevia jännityksiä. Lisäksi kiviaineksen raemuoto on poikkeuksellisen hyvä Kouvola – Luumäki rataosuudella. Näistä syistä kuvaan 7.12 on muista osuuksista poikkeaville Kouvola – Luumäki osuudelle piirretty oma trendiviiva.

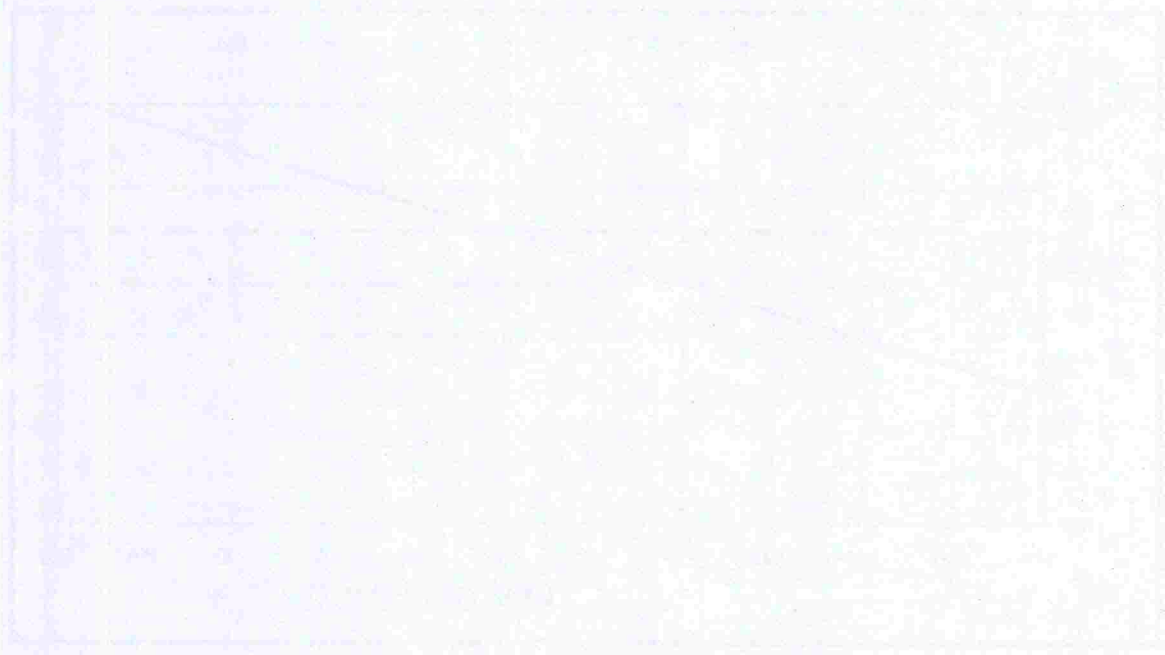
Muiden rataosuuksien osalta on todettava, että vaikka korrelaatio lujuuden ja arvioidun kestoian välillä on selvä, hajontaa silti esiintyy. Seinäjoki – Voltti osuudella (ylin neliöpiste kuvassa) kiviaines on kuitenkin selvästi lujinta, kuten arvioidun kestoian perusteella oli odotettavissakin. Kolmen muun rataosuuden kohdalla arvioidut kestoiat ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta lujuudessa on silti eroja. Eniten trendiviivasta poikkeaa Voltti – Kolppi osuus (alin neliöpiste kuvassa), jonka heikolle suorituskyyvylle on vaikea löytää selitystä. Eräänlaisena teoriana voidaan esittää, että osuuden luja kivilaji, porfyriitti on aiheuttanut heikomman kiillegneissin hajoamisen vielä suuremmissa määrin, mitä kiillegneissi yksistään olisi hajonnut. Tämäkin teoria on kuitenkin ristiriidassa Kouvola – Luumäki osuudelta saatuihin päinvastaisiin tuloksiin. Yksi selitys voi olla myös kivilajien voimakas liuskeisuus, joka saa aikaan rakeiden lohkeamisen liuskeisuuden suunnassa, jonka jälkeen litteä rae katkeaa helposti.

Kuvan 7.12 mukainen arviointi ei ota kiviaineksen muotoa lainkaan huomioon. Haurausarvo ja kuulamyllyarvo eivät mitenkään kuvasta sen paremmin raidesepelituotteen, kuin raaka-aineenkaan muoto-ominaisuuksia. Selvää kuitenkin on, että sepelirakeiden muodolla on suuri merkitys raidesepelin kestävyyyteen. Siksi nimenomaan raidesepelituotteen muotoarvon vaikutusta kestoikään olisi syytä tutkia. Tämä on järkevää siitäkin syystä, että muotoarvoon voidaan murskausteknisillä toimenpiteillä vaikuttaa toisin kuin lujuuteen. Tässä tutkimuksessa ei tuotteen muodon liittäminen kestoikään vaikuttavaksi



tekijäksi ollut mahdollista, koska tietoa sepelin muotoarvoista tukikerrosta rakennettaessa ei ollut saatavilla. Murskatusta aineksesta määritettyjä raaka-aineen muotoominaisuuksia kuvaavia arvoja ei katsottu tarkoitukseen sopivaksi. EU-normiehdotuksen [37] mukaiset tuotteen muodon arviointimenetelmät saattaisivat olla tarkoitukseen sopivia.

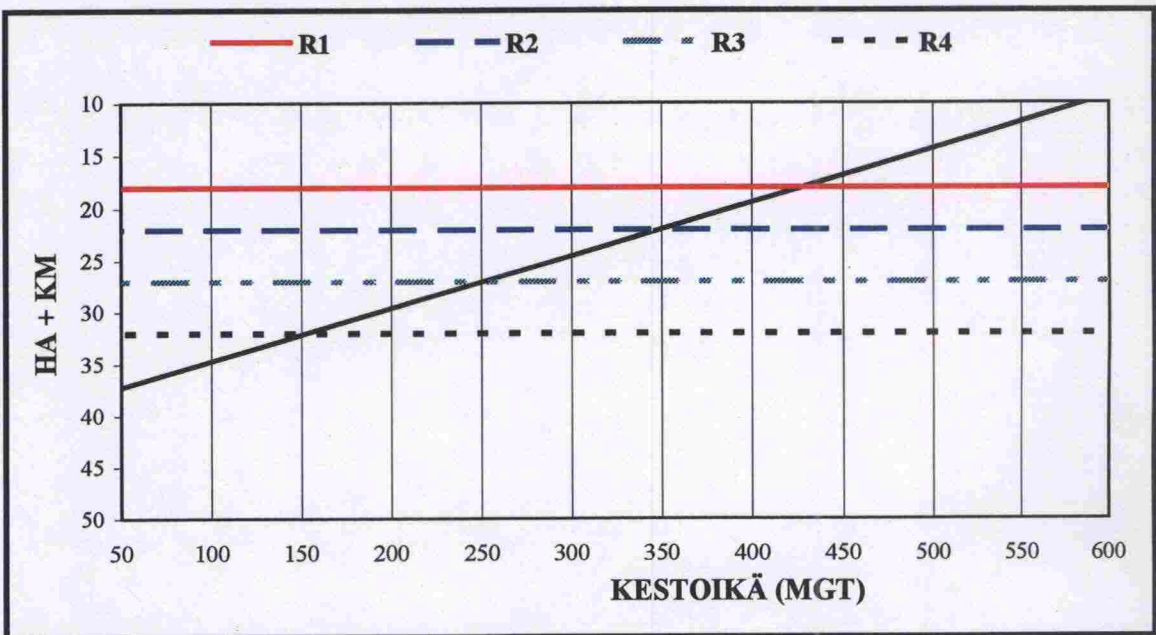
Kuvan 7.12 perusteella voidaan tukikerroksen kestoiän betoniratapölkkyraiteessa todeta riippuvan kiviaineksen lujuuden lisäksi myös muista tekijöistä, kuten kiskon jäykkyydestä, pohjamaasta ja raidesepelin raemuodosta. Lujuuden merkitys on kuitenkin kiistatta olennainen.



## 8. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 8.1 Kiviaineksen lujuuden vaikutus tukikerroksen elinkaarikustannukseen

Kun raidesepelin lujuuden ja tukikerroksen kestoiän välisen riippuvuuden lähtökohtana pidetään kuvassa 7.12 esitettyä trendiviivaa, voidaan kullekin raidesepeliluokalle arvioida kestoiä. Kuvaan 8.1 on em. riippuvuussuoran lisäksi piirretty raidesepelin luokkavaatimusten (ks. kappale 3.3.1, taulukko 3.3) perusteella lasketut luokkarajoja kuvaavat suorat. Näiden suorien ja riippuvuussuoran leikkauspisteistä on luettavissa taulukossa 8.1 esitetyt vähimmäiskestoiät eri luokille. Kyseessä on vähimmäiskestoiä siksi, että rajasuorat kuvaavat nimenomaan alimman luokkaan hyväksyttävän raidesepelin lujuutta.



Kuva 8.1 Kestoiän määrittäminen eri lujuusluokan raidesepeleillä.

On kuitenkin syytä muistaa, että riippuvuussuoran määrittämisessä oli tiettyä epävarmuutta, mistä johtuen arvioidut kestoiät ovat suuntaa-antavia. Sepelin lujuuden lisäksi kestoiään vaikuttavat myös monet muut seikat, joista merkittävimpiä ovat ratapölkky-materiaali, pohjamaan painumaherkkyys, kunnossapitotaso, raiteen jäykkyys sekä sepe-  
lin raemuoto. Kuvan 8.1 riippuvuussuoran perustana on betoniratapölkkyraide, 54 E1-  
tyypin kisko sekä vaihteleva pohjamaa.

Taulukko 8.1 Eri lujuusluokkaisesta raidesepelistä koostuvan tukikerroksen kestoiä betoniratapölkkyraiteessa.

| Raidesepelin lujuusluokka | Kestoiä MGT (vähintään) |
|---------------------------|-------------------------|
| R1                        | 430                     |
| R2                        | 350                     |
| R3                        | 250                     |
| R4                        | 150                     |



Raidesepelin lujuuden vaikutusta tukikerrokseen elinkaarikustannuksiin voidaan arvioida laskemalla kullekin sepeliluokalle taulukon 8.1 mukaisilla arvoilla kestoikä vuosissa tietyllä vuotuisella liikennemäärällä. Kullekin sepeliluokalle voidaan sitten arvioida sen elinkaaren aikana syntyvät kustannukset. Kun kustannukset muunnetaan nykyarvoon voidaan eri lujuusluokilla saavutettavia kustannuksia vertailla. Olennaista on selvittää se lujuusluokkien välinen ero hankintakustannuksessa, jonka jälkeen on elinkaarikustannuksia ajatellen edullisempaa valita heikompi kiviaines huolimatta lyhyemmästä kestoikästä. Eron selvittäminen on olennaista siksi, että hankintakustannukset vaihtelevat eri alueilla, eikä tarkkaa yksikkökustannusta tietylle sepelilaadulle voida esittää.

Taulukkoon 8.2 on laskettu yhteen kullekin sepeliluokalle eri suurilla vuotuisilla liikennemäärillä tukikerroksen puhdistuksista ja jäännösarvosta muodostuva kustannus nykyarvossa muunnettuna yksikköön mk/t. Kun tämä kustannus lisätään hankintakustannukseen, voidaan suoraan markkamääristä nähdä elinkaarikustannuksiltaan edullisin sepeliluokka. Taulukon 8.2 kustannusten laskennassa käytettiin seuraavia oletuksia:

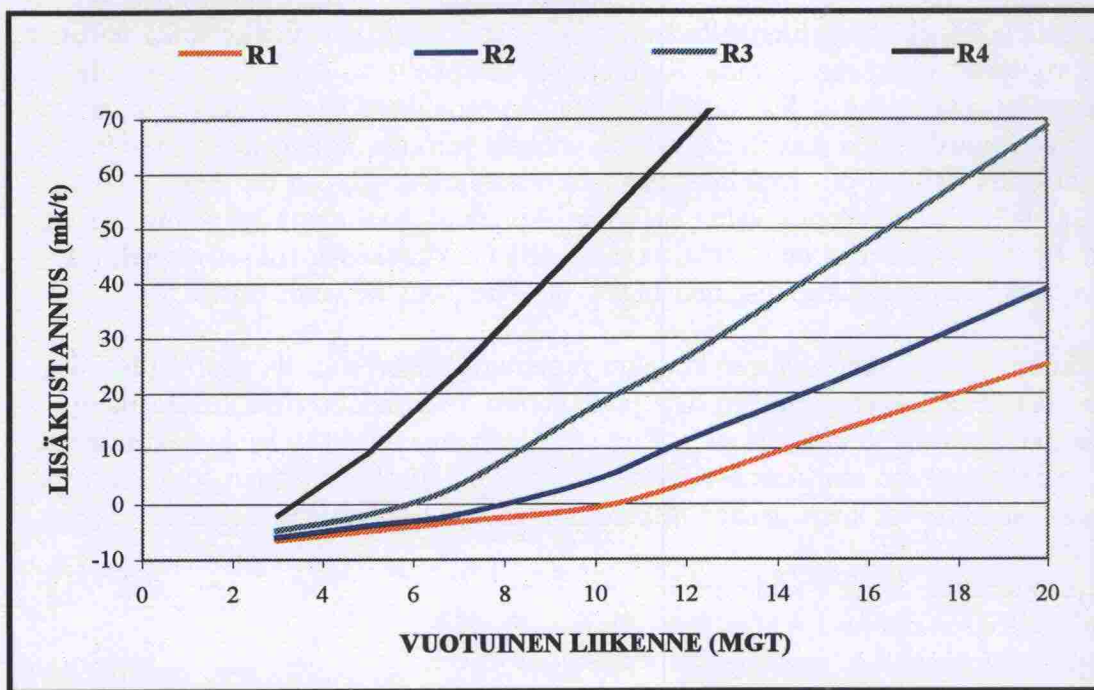
- Sepelimenekki:  $2,1 \text{ m}^3 / \text{raidemetri}$
- Tukikerroksen tiheys:  $1,8 \text{ t} / \text{m}^3$
- Sepelimenekki:  $3,8 \text{ t} / \text{raidemetri}$
- Tarkastelusykli: 40 vuotta
- Raidesepeliluokkien kestoikä taulukon 8.1 mukaiset
- Tukikerroksen puhdistuksen kustannus: 350 mk / raidemetri (sis. sepelin)
- Laskentakorko: 6 %
- Tukemiskustannuksia ei huomioitu, ero luokkien välillä oletettiin pieneksi
- Jäännösarvo tukikerrokselle laskettiin 40 käyttövuoden kohdalla kertomalla puhdistuskustannus ( $350 \text{ mk/m}$ ) jäljellä olevan kestoian suhteella alkuperäiseen kestoikaan

*Taulukko 8.2 Puhdistuksesta ja jäännösarvosta aiheutuva lisäkustannus (hankintakustannuksen lisäksi) nykyarvossa eri raidesepeliluokilla ja vuotuisilla liikennemäärillä (mk/t). Negatiiviset kustannukset ilmentävät, että tukikerrosta ei tarvitse puhdistaa tarkastelujakson, 40 vuoden aikana. Jäännösarvo saa aikaan negatiivisen kustannuksen.*

|                     |    | Rataosuuden vuotuinen liikennemäärä (MGT) |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |    | 3   | 5     | 7     | 10    | 12    | 15    | 20    |
| Raide-sepeli-luokka | R1 | -6,40                                     | -4,80 | -3,10 | -0,60 | 3,70  | 12,10 | 25,30 |
|                     | R2 | -5,90                                     | -3,80 | -1,80 | 4,40  | 11,30 | 21,20 | 39,00 |
|                     | R3 | -4,70                                     | -1,80 | 3,50  | 17,70 | 26,40 | 42,40 | 68,70 |
|                     | R4 | -1,90                                     | 9,30  | 24,30 | 49,80 | 66,90 | 93,70 |       |

Taulukon 8.2 tulokset on esitetty havainnollisemmin kuvassa 8.2. Kuvasta nähdään, kuinka pienillä, alle 4 MGT vuotuisilla liikennemäärillä, käyrät ovat hyvin lähellä toisiaan. Tämä tarkoittaa sitä, että tällöin pienikin ero sepelin hankintakustannuksissa saa aikaan halvemman sepelin edullisuuden myös elinkaaritalousellisesti. Vuotuisen liikennemäärän kasvaessa käyrien väliset erot kasvavat, jolloin alemman luokan sepelin on oltava selvästi halvempaa ennen kuin se on koko elinkaarta ajatellen ylemmän luokan sepeliä edullisempaa.





Kuva 8.2 Puhdistuksen ja jäännösarvon aiheuttama lisäkustannus eri sepeli-luokilla ja vuotuisilla liikennemäärillä.

Tarkastellaan esimerkkinä tavanomaista tilannetta, jossa osuuden vuotuinen liikennemäärä on 10 MGT ja ongelmana on valinta tarjottujen R1- ja R3 luokan sepelien välillä. Hankintakustannus R1 luokan sepelille on 50 mk/t ja R3 luokan sepelille 40 mk/t. Kun huomioidaan taulukon 8.2 lisäkustannus, saadaan R1 luokan sepelille kustannukseksi 49,40 mk/t ja R3 luokan sepelille 57,70 mk/t. Täten heikompilaatuinen sepeli koituu alhaisemmasta hankintakustannuksestaan huolimatta kalliimmaksi, kun koko elinkaari huomioidaan.

## 8.2 Raidesepelin rataosakohtaisen laatuvaatimuksen tarpeettomuus

Raidesepelin valinta tulisi tehdä kappaleen 8.1 mukaisena elinkaarikustannusvertailuna raidesepelitarjouksien perusteella. Sepelin laatutasolle ei voida ennalta asettaa rajoja rataosan liikennemäärän, eikä minkään muunkaan perusteella. Edullisin laatutaso selviää vasta sepelitarjouksista saatavien hankintakustannusten ja kestojen pohjalta määräytyvien puhdistuskustannusten sekä jäännösarvon vertailussa. Jonkinlaisena nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin sanoa, että R4 luokan sepeli ei ole edullisin vaihtoehto, mikäli rataosuuden vuotuinen liikennemäärä on yli 7 MGT. Vastaava raja R3 luokan sepelillä on 15 MGT.

Myöskään vaatimus tukikerroksen 40 vuoden kestoikästä ei ole elinkaaritaloudellisesti järkevä silloin, kun lyhyemmän kestoajan omaavalla, hankintahinnaltaan halvemmalla sepelillä on mahdollista päästä edullisempaan ratkaisuun. Suuren vuotuisen liikennemäärän rataosuuksilla ei ole ylipäätään mahdollista saavuttaa 40 vuoden kestoikää millään kivilajilla.



### 8.3 Seulonnan yhteydessä rataa palautettavan kiviaineksen lujuus

Lujuustutkimustuloksista kävi ilmi, että tukikerroksen kiviaines on jokaisella tutkitulla rataosuudella huomattavasti heikompaa kuin nykyiset laatuvaatimukset kiviainekselta edellyttävät (taulukko 7.3). Vastaava suuntaus lienee totuudenmukainen useimmilla 1960, -70 ja vielä -80 -luvullakin sepelöidyillä rataosuuksilla, sillä tuolloin kiviaineksen laatuvaatimukset olivat nykyisiin nähden lievät.

Vielä nykyisinkin tukikerroksen seulonnan yhteydessä palautetaan rataa vanha, heikkolaatuinenkin seulan silmäkokoa karkeampi kiviaines. Hyvänä esimerkkinä tästä on Kouvola – Luumäki rataosuus, jossa perusparannuksen yhteydessä vuosina 1989-92 vanha, selvästi luokaton rapakivigraniitti palautettiin rataa huolimatta siitä, että rataosuuden liikennemäärät ovat maamme suurimmat. Voidaankin siis pohtia, onko tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä järkevää palauttaa vanha lujuudeltaan heikko kiviaines rataa, kuten Suomessa on tehty. Mikäli näin toimitaan, voidaan edelleen kysyä onko täydentävän kiviaineksen suurelle laatuvaatimukselle perusteita, kun valtaosa kiviaineksestä on kuitenkin selvästi heikompaa. Puhdistuksessa on lisäksi ongelmana se, että puhdistuskoneen seulalle jää aina huomattava määrä seulakokoa pienempää ainesta, koska aines on kostea ja kokkareista ja tarttuneena palautettavien rakeiden pinnoille. Mikäli tukikerroksessa on seulakokoa karkeampia rakeita alle 30 %, on koko tukikerroksen uusiminen Pohjois-Amerikassa todettu seulontaa edullisemmaksi [10].

Tukikerroksesta otettu näyte soveltuu kiviaineksen lujuuden määrittäviin kokeisiin. Lujuus olisi järkevää testata ennen puhdistusta silloin, kun halutaan selvittää onko karkean fraktion palauttaminen rataa järkevää.

### 8.4 Rakeisuuslukunäytteenoton menetelmä

Nykyinen näytteenottomenetelmä on yksinkertaisuutensa vuoksi kustannuksiltaan kohtuullisen edullinen menetelmä. Myöskään näytteenoton menetelmävirhe ei ole niin suuri, että se estäisi menetelmän käytön, kunhan näyte otetaan huolellisesti. Etenkin näytteenottosyvyyden on oltava ohjeen mukainen, jotta rakeisuuslukujen vertailu on mahdollista myös eri näytteenottajien saamien tulosten välillä. Näytteenoton aloitus- ja lopetustasoilla on kuitenkin ongelmallista määrittää mitkä rakeet ja mikä hienoaines kuuluu näytteenottoalueeseen ja mikä on peräisin sen ulkopuolelta. Tässä saattaa eri näytteenottajien välillä esiintyä systemaattisia eroja.

EU-normiehdotuksen [37] mukainen näytteenottokehys helpottaa tilannetta näiltä osin, mutta sen käyttöön sisältyy muita ongelmia, joista suurin on tukikerroksen ja välikerroksen rajapinnan määrittäminen. Sydännäytekairaukseen perustuva näytteenotto on kustannuksiltaan kaksinkertainen perinteiseen menetelmään nähden, eikä siksi liene kilpailukykyinen.

Radan pinnalta käsin tehtävien radiometristen menetelmien soveltuvuutta tukikerroksen arviointiin on alettu pohtia. Kustannuksiltaan nämä menetelmät saattavat olla edullisimpia, joten mikäli esim. maatutkalla päästään riittävään tarkkuuteen, voisi se olla sopiva arviointimenetelmä tulevaisuudessa.

### 8.5 Puhdistusrajan määrittäminen

Tukikerroksen puhdistusrajaa olisi syytä arvioida tarkemmin. Suomen sekaliikenne asettaa radalle suuret vaatimukset, jolloin puhdistusrajan sijainti vaikuttaa merkittävästi radan tukemistarpeeseen elinkaaren loppuvaiheissa ja siten elinkaarikustannuksiin.

Olisi ensiarvoisen tärkeää selvittää missä vaiheessa raiteen geometriaa ei enää tukemisen keinoin saada pysymään tyydyttävällä tasolla ja liittämään tämä tila jotenkin tukikerroksen saavuttamaan rakeisuuteen. Raiteen geometrian tyydyttävä taso riippuu rataosuuden kunnossapitotasosta, joten myös puhdistusrajaa olisi syytä tarkastella kunnossapitotasoittain. Tietyn kunnossapitotason puhdistusrajan selvittämiseksi ei liene muuta keinoa, kuin rakeisuuden määrittäminen rata-alueilta saadun tiedon mukaan sellaisilta rataosuuksilta, joilla tukeminen on todettu tehottomaksi.



## 9. YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Päätös raidesepelin laadun valinnasta on aiemmin perustunut rataosuuden vuotuisen liikennemäärään. Sen pohjalta on arvioitu sepelilaatu, jolla saavutetaan tukikerrokselle vaadittu kestoikä. Valinnassa ei ole lainkaan huomioitu erilaatuisten sepelien hankintakustannusten ja kestoiästä riippuvien puhdistuskustannuksen eroja. Tästä syystä luotiin em. tekijät huomioiva peruste sepelilaadun valintaan.

Tutkimuksen teoreettiseksi perustaksi selviteltiin kirjallisuuslähteiden pohjalta tukikerrokselle osoitettavia tehtäviä ja niiden perusteella raidesepeliltä vaadittuja ominaisuuksia. Liikennekuormituksen todettiin jakautuvan pitkin rakeiden välisiä jännitysketjuja tasaisen jakautumisen sijaan.

Tukikerroksen hienoainekseen kiinnitettiin erityistä huomiota, sillä hienoainespitoisuuden todettiin määräävän tukikerroksen kyvyn täyttää sille osoitetut tehtävät. Raidesepelin jauhautuminen arvioitiin merkittävimmäksi hienoaineksen lähteeksi silloin, kun avovaunuista putoava osuus ei ole poikkeuksellisen suuri. Näytteitä tukikerroksen hienoaineksesta olisi kuitenkin syytä analysoida, jotta saataisiin selville onko alusrakennemateriaalia tunkeutunut ylöspäin.

Kirjallisuuslähteissä todettiin akselipainon korottamisesta 25 tonnista 35 tonniin aiheutuva raidesepelin jauhautumisen lisääntyminen vähäiseksi, silloin kun kiviaines on suhteellisen lujaa. Riippuvuus kumulatiivinen liikennemäärän ja tukikerroksen hienoainespitoisuuden välillä arvioitiin sitä vastoin likimäärin lineaariseksi. Jauhautuminen betoniratapölkkyradassa todettiin huomattavasti puuratapölkkyrataa suuremmaksi. Raidesepelin raemuodon merkitys jauhautumiseen havaittiin merkittäväksi. Tutkimusmahdollisuuksia raemuodon vaikutuksesta jauhautumiseen olisi syytä pohtia, sillä raemuotoon on mahdollista vaikuttaa tuotantoteknisin menetelmin toisin kuin lujuteen.

Näytteenottomenetelmiä vertailtaessa todettiin, että rakeisuuskunäytteenoton menetelmävirhe ei estä menetelmän käyttöä. Vaihtoehtoisia hienoainespitoisuuden arviointimenetelmiä tulisi kuitenkin testata. Sydännäyteporaus saattaa olla kustannustensa vuoksi kilpailukyvytön ratkaisu. Maatutkalla on Iso-Britanniassa saatu lupaavia tuloksia. Tämän menetelmän tutkimusmahdollisuuksia Suomen oloissa olisi syytä pohtia. Kyseen saattaisi tulla yhdistetty tutkimus koskien tukikerroksen hienoainespitoisuutta ja routalevyjen kuntoa.

Puhdistusrajan määrittämisen tärkeyttä perusteltiin. Puhdistusrajan määrittämiseksi todellisiin kokemuksiin perustuvaksi tulisi rakeisuuskunäytteitä ottaa sellaisilta rataosuuksilta, joilla ei tukemisella enää saavuteta haluttua asemaa raiteelle.

Elinkaariajattelun periaatteita kuvattiin radan tukikerrokseen sovellettuna. Työssä esitettiin AAR:n kehittämä elinkaarikustannusmalli BALLAST2 sekä sen mallinnuksen tuloksia.

RHK:n rakeisuuskunäytetietokannan perusteella esitettiin arvioita hienoaineksen lisääntymisestä kumulatiivisen liikennemäärän funktiona. Hienoainespitoisuuden saavuttaessa puhdistusrajan saatiin samalla arvio tukikerroksen kestoiästä eri rataosuuksilla. Rakeisuuskunäytteenoton toinen kierros olisi syytä aloittaa ja kohdistaa harkituille rataosuuksille, jotta saadaan käsitys hienoainespitoisuuden kehityksestä kumulatiivisen lii-

kennemäärän suhteen. Olisi myös hyödyllistä aloittaa rakeisuuden kehityksen seuraaminen yksittäisellä rataosuudella heti elinkaaren alusta (puhdistuksesta) lähtien.

Valituilta rataosuuksilta otettiin näytteitä, joiden lujuus- ja muoto-ominaisuudet testattiin. Yhdistämällä testituloksista saatu raideseppelin lujuustieto ja em. tukikerroksen kestoikäarvio saatiin arvio tukikerroksen kestoiästä raideseppelin lujuuden funktiona. Tulosten hajonnan vuoksi olisi lujuustestausta radasta otetuista näytteistä aiheellista jatkaa. Tällöin saataisiin luotettavampi arvio tukikerroksen kestoiästä kiviaineksen lujuuden funktiona. Kustannusten säästämiseksi näytteenotto olisi järkevää yhdistää em. rakeisuuslukunäytteenottoon.

Lopuksi tarkasteltiin eroja eri lujuusluokan raidesepeillä saavutettavissa elinkaarikustannuksissa. Tarkastelussa huomioitiin erot erilaatuisten raideseppien hankintakustannuksissa sekä kestoiässä ja siitä seuraavissa puhdistuskustannuksissa. Saatu elinkaaritaloudellisuuteen pohjautuva tulos ohjaa elinkaarikustannuksiltaan edullisimman raidesepeiläadun valintaa.



## LÄHDELUETTELO

1. Aalto, P. (1999). Raiteen tukemisen ja stabiloinnin yleiset laatuvaatimukset. Insinöörityö. Kouvola. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. 31 s., 8 liites.
2. Banverket (1996). Geoteknisk inventering. Banverket. 30 Ton på Malmaban/Ofofbanan, Infrastruktur, rapport 3.4. 53 s., 65 liites.
3. Burks, M. E. & et al. (1975). Comparison of Robel Supermat and Plasser 07-16 track maintenance machines. Tech. note TN SM 139, British Railways Board R & D Division.
4. Callagher, G. P. et al. (1999). Laboratory and full-scale prototype evaluation of ground penetrating radar on railway trackbed ballast. Proceedings of World Congress of Railway Research 1999, Tokio 19.-23.10.1999. 7 s.
5. Canadian National Rail (CN), Geotechnical Services (1987). Ballast performance in concrete tie track, Prairie region. Edmonton, internal report. 130 s.
6. Canadian National Rail (CN), Geotechnical Services (1990). Ballast failures in concrete tie track, Ashcroft subdivision. Edmonton, internal report. 101 s.
7. Canadian Pacific Rail (1984). Specification for ballast Sections I and II. Montreal, CP Rail. 12 s.
8. Chrismer, S. M. (1985). Considerations of factors affecting ballast performance. Chicago, Association of American Railroads (AAR), Technical Center, report No. WP 110. 48 s.
9. Chrismer, S. M. (1988). Recent developments in predicting ballast life and economics. Chicago, Association of American Railroads (AAR), Technical Center, report No. WP-132. 30s.
10. Chrismer, S. M. et al. (1992). Investigation of ballast conditions before and after undercutting. Chicago, Association of American Railroads (AAR), Technical Center, report No. R-818. 76 s., 104 liites.
11. Chrismer, S. M. (1994). Guidelines for the selection of ballast material and maintenance technique. Chicago, Association of American Railroads (AAR), Technical Center, report No. R-876. 55 s.
12. Chrismer, S. M. & Selig, E. T. (1994). Mechanics-based model to predict ballast-related maintenance timing and costs. Chicago, Association of American Railroads (AAR), Technical Center, report No. R-863. 145 s.
13. Clifton, A. W. et al. (1987). Ballast production and testing. Session on Performance of Aggregate in Railroads, Transportation Research Board, Washington, D. C. 1987. 19 s., 15 liites.

14. Collingwood, B. I. (1988). An investigation of the causes of railroad ballast fouling. M.Sc. degree project report. Geotechnical report No. AAR 88-350P. Amherst, University of Massachusetts, Department of Civil Engineering. 109 s.
15. EN 933-3. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape – Flakiness index.
16. EN 933-4. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 4: Determination of particle shape – Shape index.
17. EN 1097-1. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval).
18. EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.
19. Esveld, C. (1989). Modern railway track. Nederländische Stahlbahn (NS), Permanent Way Department. 446 s.
20. Esveld, C. (1993). Uniform ballast assessment criteria. Rail Engineering International, 2/1993. s. 11-13.
21. European Rail Research Institute (ERRI) (1991). Unified assessment criteria for ballast quality and methods for assessing the ballast condition in the track, report No. 2, Assessment of ballast condition in the track. Utrecht, ERRI D 182. 33 s., 44 liites.
22. European Rail Research Institute (ERRI) (1995). Unified assessment criteria for ballast quality and methods for assessing the ballast condition in the track, report No. 4, Standardized technical specifications and description of the quality assurance system for railway ballast. Utrecht, ERRI D 182. 18 s., 27 liites.
23. Feng, D. M. (1984). Railroad ballast performance evaluation. M.Sc. degree project report. Report No. AAR89-359P. Amherst, University of Massachusetts, Department of Civil Engineering.
24. Gaskin, P. N. & Raymond, G. P. (1976). Contribution to selection of railroad ballast. ASCE Transportation Engineering Journal, May 1976.
25. Gåsemyr, H. (1996). Överbygningens komponenter, Ballast. Föreläsning material, Nordisk Banteknisk Ingerjörutbildning 18.11.1996, Ellivuori. 32 s.
26. Jernbaneverket (JBV) (1999a). Laerebok i jernbaneteknikk, L 521, Kapittel 2, Banelegeme. Forelopig utgave. 29 s.
27. Jernbaneverket (JBV) (1999b). Laerebok i jernbaneteknikk, L 533, Kapittel 5, Ballast. Forelopig utgave. 23 s.
28. Jernbaneverket (JBV) (1999c). Laerebok i jernbaneteknikk, L 534, Kapittel 7, Ballastrensing. Forelopig utgave. 17 s.



29. Klassen, M. J. et al. (1987). Track evaluation and ballast performance specifications. Session on Performance of Aggregate in Railroads, Transportation Research Board, Washington, D. C. 1987. 16 s., 34 liites.
30. Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisuja 223. 188 s., 13 liites.
31. Kuula-Väisänen, P. (1999). Tukikerrosmateriaalit EU-normiprojekti, Laboratorio-tutkimusten tulokset. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 9 s.
32. Laitinen, J. (1992). Sepelitukikerroksen kunnon selvitys Oulun ratakeskuksen alueella. Insinööritoimisto. Oulun teknillinen oppilaitos, rakennustekniikan osasto. 48 s., 24 liites.
33. Lehtinen, M et al. (toim.) (1998). Suomen kallioperä. Suomen Geologinen Seura. 373 s.
34. Mekechuk, J. (1991). Advanced ballast technology. Lecture material. 89 s.
35. Nordisk Bro og Geoteknisk samarbeid (NBGS) (1997). Temarapport: Ballast. 16 s., 27 liites.
36. Palmu, T. (1996). Raidesepelin toimituksen vaiheet ja niiden kustannukset. RHK, Tekninen yksikkö. 16 s., 8 liites.
37. prEN 13450 (1999). Aggregates for railway ballast. 27 s.
38. Puikkonen, E. (1989). Ratatekniikka. Forssa, Suomen maarakentajien keskusliitto ry.
39. Ratahallintokeskus (1998). Päälysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset (PYL), Tukikerroksen vaihto-/ puhdistustyön yleiset laatuvaatimukset. 9 s.
40. Ratahallintokeskus (1998). Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohje. 2 s.
41. Ratahallintokeskus (1999a). Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne, luonnos. 99 s., 47 liites.
42. Ratahallintokeskus (1999b). Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Helsinki, Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö, julkaisu A 6/1999.
43. Raymond, G. P. (1979). Ballast selection and grading: A summary report. Kingston, Canadian Institute of Guided Ground Transport (GIGGT). 50 s.
44. Raymond, G. P. (1985a). Higher standards for track ballast. Progressive railroading, April, 1985. s. 51-56.
45. Raymond, G. P. (1985b). Research on railroad ballast specifications and evaluation. Transportation Research Record 1006. s 1-8.

46. Raymond, G. P. & Bathurst, R. J. (1987). Performance of Large-Scale Model Single Tie-Ballast Systems. *Transportation Research Record* 1131, s 7-14.
47. Reissberger, K. (1998). Track, part of the system "railway". Lecture material, Nordic railway seminar 1998. 46 s.
48. Selig, E. T. & Roner, C. J. (1987). Effects of particle characteristics on behaviour of granular material. *Transportation Research Record* 1131. s. 1-6.
49. Selig, E. T. et al. (1992) Sources and causes of ballast fouling. Chicago, Association of American Railroads (AAR), Technical Center, report No. R-805. 21 s., 36 liites.
50. Selig, E. T. & Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London, Thomas Telford Publications. 407 s.
51. SFS-EN 933-3 (1997). Kiviaineksen geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku. Rakennustuoteteollisuus. 7 s.
52. Simon, R. M. et al. (1983). Ballast and subgrade requirement study; Railroad track substructure-materials evaluation and stabilization practices. Washington, D. C., U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, report No. FRA/ORD-83/04.1.
53. Tolppanen, P. et al. (1999). 3-D-laser analysis of size, shape and roughness of railway ballast: Research in progress. Austin, Proceedings on "Aggregates; concrete, bases and fines", 7<sup>th</sup> annual symposium of International Center of Aggregate Research (ICAR).
54. Tomperi, J. (1979). Kuormittamattoman raiteen tukikerroksen sivuttaisvastus ja sen vaikutus jatkuvakiskoraiteen vakavuuteen. Diplomityö. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu. 105 s., 17 liites.
55. Trevizo, M. C. (1997). FAST heavy axle load ballast test results. Pueblo, Association of American Railroads (AAR), Transportation Technology Center, report No. R-914. 35 s.
56. Turunen, A. (1986). Raidesepelin lujuuden arviointi haurauskokeen perusteella. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto. 53 s., 19 liites.
57. Uusi-Luomalahti, P. J. (1994). Raidesepeliksi soveltuvan kiviaineksen laatuvaatimukset. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto. 97 s., 19 liites.
58. Uusinoka, R. P. J. et al. (1994). Laboratory methods applied in predicting the durability of railway ballast in natural conditions of Finnish Precambrian bedrock. Oliveira, R. et al. (toim.). Proceedings of the Seventh International Congress on International Association of Engineering Geology 5-9.9.1994, Lisboa. Rotterdam, A.A. Balkema. s. 3207-3210.



59. Valtionrautatiet (1978). Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 11: Rautatien maarakennustyöohjeet. Helsinki, Valtionrautatiet, rataosasto. 6 s.
60. VR-Rata Oy (1995a). Raidesepelin laatuvaatimukset 1995. Helsinki, VR-Rata Oy, suunnitteluosasto. 30 s.
61. VR-Rata Oy (1995b). Sepelilouhosten inventointi 1995. Tampere, VR-Rata Oy, Länsi-Suomen Ratakeskus. 73 s.
62. Wright, S. E. (1983). Damage caused to ballast by mechanical maintenance techniques. British Rail Research Technical Memorandum, May 1983.

# TUKIKERROKSEN SILMÄMÄÄRÄINEN ARVIOINTI

## 1. Taustaa

Tukikerroksen silmämääräinen arviointi ratapölkyn päähän kaivetusta kuopasta oli osa DI-työtä. Koska arviointi saatiin tehdyksi muuta tutkimusta aiemmin ja koska se voitiin luonnollisella tavalla erottaa muusta tutkimuksesta, raportoitiin se ennen varsinaisen DI-työn valmistumista. Tämä raportti päätettiin sijoittaa erillisenä osana DI-työn liitteeksi. Silmämääräisen arvioinnin ja muun tutkimuksen yhtenevät osiot, kuten rakeisuusluvunäytteenotto ja luvun määrittäminen on tarkemmin selitetty DI-työssä.

## 2. Tarkoitus

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella silmämääräisesti betoniratapölkyn alla tapahtunutta jauhautumista ratapölkyn päähän kaivetusta kuopasta. Pyrkimyksenä oli selvittää onko silmämääräisen arvion ja kohteesta määritetyn rakeisuusluvun välillä korrelaatiota. Samalla tuli pohtia voitaisiinko tukikerroksen kuntoa arvioida nykyisin RHK:ssa käytössä olevan rakeisuusluvun sijasta visuaalisesti. Lisäksi tuli mitata tukikerroksen dimensioidet sekä sen kerroksen korkeus, jonka huokostila oli kokonaan hienoaineksen täyttämä.

## 3. Tutkitut rataosuudet

Tutkittavien rataosuuksien valintakriteerit on mainittu DI-työn kenttätutkimuksia käsittelevässä luvussa. Silmämääräinen arviointi keskitettiin kahdelle erityyppiselle ja oletettavasti eri asteisesti jauhautuneelle rataosuudelle vertailtavuuden saavuttamiseksi.

Kouvola – Luumäki osuus on perusparannettu 1980-90 luvun vaihteessa, missä yhteydessä myös sepelitukikerros seulottiin. Kaksiraiteisen osuuden tarkastelun alaisella, eli betoniratapölkkyosalla keskimääräiset rakeisuusluvut olivat 34 ja 36 kesällä 1996 mitattuina.

Tampere – Orivesi osuudella tukikerros on huomattavasti vanhempi, samoin kuin kumulatiivinen liikennemäärä suurempi, kuin Kouvola – Luumäki osuudella. Keskimääräinen rakeisuusluku tarkastellulla eteläisellä raiteella (raide 1), välin 187 – 216 km betonipölkkyosuudella, oli kesällä 1996 mitattuna 64.

## 4. Arviointi

Tutkitun ratapölkyn päähän kaivettiin kuoppa, jonka tarkoituksena oli ulottua alusra-kenteeseen saakka. Kuoppaa kaivettaessa tuli varoa luhistamasta sen reunoja, etenkin pölkyn alapuolista seinämää, jotta hienoaines ei pääsisi varisemaan kuopan pohjalle ja vääristäisi näin ollen arviointia. Tätä pyrkimystä voitiin edesauttaa kaivamalla kuopan yläosa riittävän laajaksi, koko palteen levyiseksi ja n. kahden pölkynvälin pituiseksi, jolloin tutkittava pölkky oli luonnollisesti välin keskimäinen. Kaivamiseen käytettiin



tavallista teräväkärkistä soralapiota. Syvemmältä kaivettaessa parhaaksi työkaluksi osoittautui kenttälapio hakku-asennossa.

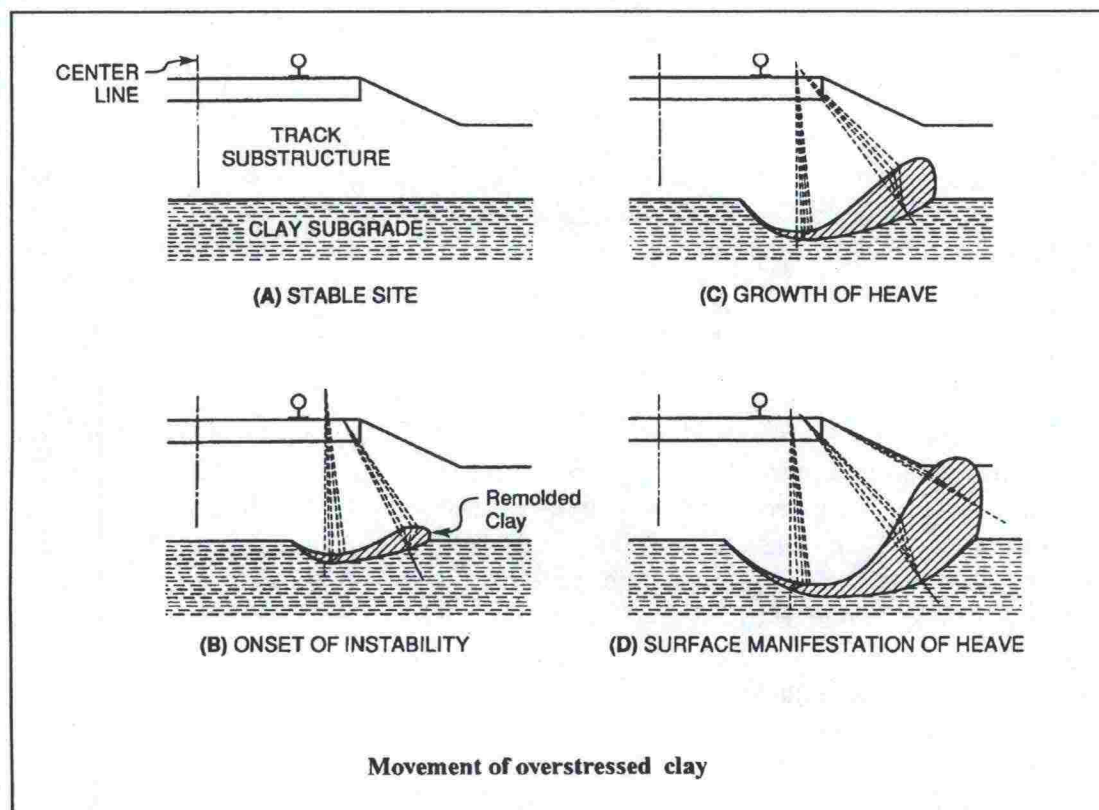
Jokaisesta tutkitusta kohteesta otettiin lisäksi tukikerroksen laadun tutkimusohjeen mukaisesti rakeisuuslukunäyte ja määritettiin rakeisuusluvun arvo.

## 5. Teoriaa aiheesta

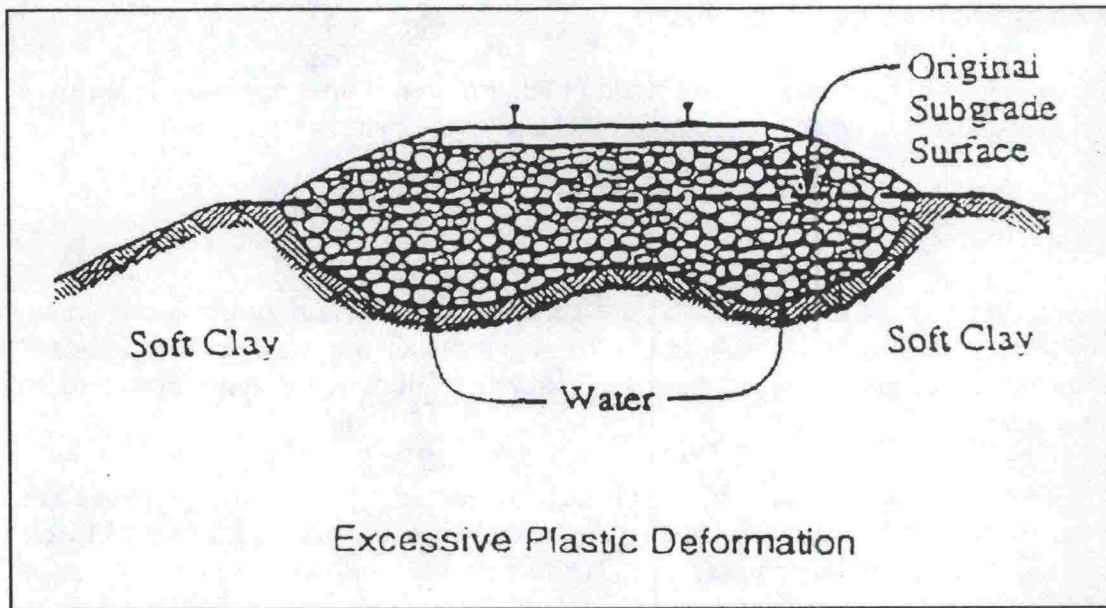
Vastaavan tyyppistä menetelmää käytetään ainakin AAR:ssa, kun kunnostustoimenpiteitä pohdittaessa pyritään selvittämään onko ongelmat radan epätasaisuudessa ylipääntään sepelistä johtuvia ja siten tukikerrokseen kohdistuvilla kunnossapitotoimenpiteillä korjattavissa.

AAR:n menetelmässä kaivanto tehdään yleensä koneellisesti ja ulotetaan pohjamaahan asti. Rakennekerroksista otetaan näytteitä yksinkertaisia tutkimuksia varten. Lisäksi määritetään rakennekerrosten paksuudet. Näillä tiedoilla voidaan selvittää syy radan epätasaisuuteen sekä edullisin kunnostustoimenpide.

Sepelistä riippumatta ongelma voi olla seurausta liian suuren pohjamaahan kohdistuneen jännityksen synnyttämästä liukumasta (kuva 1), tai karkeiden rakennekerrosten painumisesta pohjamaahan (kuva 2). Molemmissa tapauksissa edullisimpia kunnostustoimenpiteitä voisivat olla rakennekerrosten paksuuden lisääminen, tai rakeisuuden muuttaminen pohjamaahan kohdistuvien jännitysten pienentämiseksi. /1/.



Kuva 1. Liukuman syntyminen pohjamaassa.



Kuva 2. Rakennekerosten painuminen pohjamaahan ja siitä aiheutuva vesitasku.

AAR on kehittänyt BALLAST2-mallin, jonka pyrkimyksenä on osoittaa elinkaarikustannusten kannalta edullisin kunnossapitovaihtoehto tukikerrokselle. BALLAST2:ta voidaan käyttää vain, jos ongelmat voidaan yhdistää sepeliin. Suuresti likaantuneen sepelin raja-arvona eli puhdistusrajana AAR käyttää 30 % läpäisyä 4,75 mm seulalla. Suomessa käytössä olevan puhdistusrajan (rakeisuusluku = 88) tasoisessa sepelissä tavallinen läpäisy 4,8 mm seulalla on n. 20%.

## 6. Havainnot

Tukikerroksen likaantumisasteen silmämääräinen arviointi kaivetun kuopan seinämästä osoittautui varsin subjektiiviseksi menetelmäksi. Suoraa vastaavuutta aiemmin, tai tämän tutkimuksen yhteydessä mitatun ja silmämääräisesti arvioitun rakeisuusluvun välille ei tutkimuksen nojalla voida esittää. Arvion tarkkuus suhteessa mitattuun vaihteli runsaasti. Arviointia hankaloitti tukikerroksen kosteuspitoisuuden ja kiviaineksen värin vaihtelut.

Kouvola – Luumäki osuuden kohteista mitatut rakeisuusluvut vaihtelivat välillä 26-65. Mitään silmin havaittavaa eroa kohteiden hienoainepitoisuudessa ei ollut (kuvat 3-4). Tässä tutkimuksessa määritetyt rakeisuusluvut korreloivat hyvin vuonna 1996 määritettyjen kanssa. Seulontatuloksista kävi ilmi, että lisäys 25 mm seulan läpäisyssä ei ollut merkittävää, kun taas 1 mm ja 8 mm seulojen läpäisyprosentit olivat nyt kaikissa tapauksissa selvästi suuremmat kuin vuonna 1996.

Tampere – Orivesi osuudella tukikerroksessa oli selvästi enemmän hienoainesta. Kolme (kuvat 5-7) tutkitusta neljästä kohteesta ylitti rakeisuusluvultaan puhdistusrajan 88. Neljäs paikka oli jokin aikaa sitten tapahtuneen routaeristyksen yhteydessä puhdistettu ja erottui puhtaudellaan selvästi muista. Sen rakeisuusluvuksi tuli 35 (kuva 8). Tällä osuudella vertailua aiempiin rakeisuuslukumittauksiin ei voitu tehdä, koska niiden tarkka sijainti ei täsmännyt tämän tutkimuksen kohteisiin.



Yleisesti oletetaan, että jauhautunut hienoaaines vajoaa tukikerroksen pohjalle. Jauhautumisen edetessä tukikerroksen huokostila täyttyy hienoaineksesta kerroksen pohjalta alkaen. Tukikerroksen puhdistusraja saavutetaan, kun sen koko huokostila on hienoaineksen täyttämä, jolloin tukikerros ei enää toteuta sille asetettuja vaatimuksia.

Tässä tutkimuksessa yhtenä tarkoituksena oli mitata hienoaineksen täyttämän kerroksen paksuus. Tarkasteluissa kävi kuitenkin ilmi, että silmämääräisesti ei ole mahdollista havaita selvää rajaa hienoaainespitoisuudessa. Tampere - Orivesi osuuden joissakin kohteissa (kuvat 5-7) vaikutti siltä että koko tukikerroksen huokostila oli hienoaineksen täyttämä. Tätä käsitystä tukevat myös suuret (>88) mitatut rakeisuusluvut. Myöskin niissä kohteissa, joissa jauhautuminen oli vähäisempää sisälsi koko tukikerros hienoaainesta eikä selvää rajaa ollut nähtävissä. Arvioita siitä, kuinka paljon tyhjättilaa tukikerroksessa oli, ja sitä kautta jäljellä olevaa käyttöikää ei ollut mahdollista esittää.

Routaeristettyä kohdetta lukuun ottamatta oli kaikissa tutkituissa kohteissa tukikerroksen ja alusrakenteen välinen raja hyvin epämääräinen. Jauhautuneen kiviaineksen ja alusrakenteen maa-aineksen erottaminen silmämääräisesti oli mahdotonta. Tosin monin paikoin jo tasolla -40 cm pölkyn yläpinnan tasolta luettuna hienoaaines näytti vaaleanruskealta, soraperäiseltä (kuva 9). Tämä herätti epäilyjä alusrakenteen tunkeutumisesta ylöspäin, koska tukikerros pyritään rakentamaan 55 cm korkeaksi. Hienoaineksen alkuperää voitaisiin tutkia näytteen raemuodoista mikroskoopin avulla. Pyöristyneet rakeet ovat peräisin sorasta, eli alusrakenteesta. Kulmikkaammat ovat raidesepelistä jauhautuneita. Toisaalta sepelirakeita löytyi niin syvältä, kuin kaivamista jatkettiin, jopa -75 cm:stä, millä tasolla hienoaaines oli selvää soraa.

Mitatuilla tukikerroksen dimensioilla ei havaittu olevan yhteyttä jauhautumisen asteen. Tämä on luonnollista, koska mitat muuttuvat elinkaaren aikana. Kiviainesta on saatettu lisätä hiljattain esim. palteeseen, jolloin käsitystä tähänastisen elinkaaren keskimääräisistä dimensioista ei saada.

## 7. Johtopäätökset

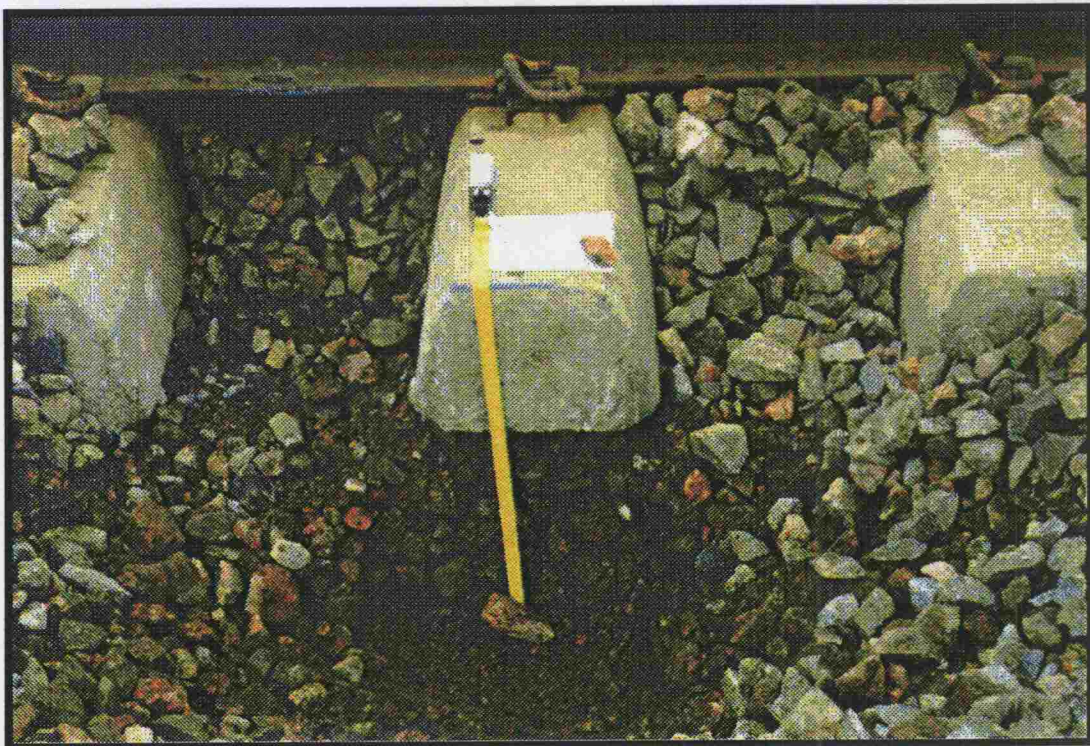
Arvioita tukikerroksen jäljellä olevasta käyttöiästä ei tämän tutkimuksen mukaisella silmämääräisellä arvioinnilla esittää. Silmämääräinen arvio rakeisuusluvusta on suuntaa antava, mutta sen tarkkuus on huono, kuten liitteenä olevista valokuvista voidaan todeta. Täten arviointiin perustuva menettely tukikerroksen kunnosta tässä yhteydessä toteutetun mukaisena ei ole korvaava menetelmä tällä hetkellä käytössä olevalle tukikerroksen laadun tutkimusohjeen mukaiselle rakeisuusluvun määrittämiselle. Silmämääräisesti arvioimalla puhdistusrajan määrittäminen on subjektiivista, liiaksi arvioijasta riippuvaa. Tietyn vertailutason määrittäminen olisi välttämätöntä, mutta ongelmallista.

Sen sijaan, kun pohditaan edullisinta kunnossapitomenetelmää on tarpeen selvittää syy radan epätyydyttävään tasoon. Mikäli tukikerros ei ole suuresti likaantunutta ja rata on silti epätyydyttävä, voi syy olla sepelistä riippumaton. Tässä tutkimuksessa käytetty suurempaa, koko radan rakenteen poikkileikkaavaa kaivantoa on ainakin AAR:ssa käytetty menestyksekkäästi syiden selvittämiseen. /1/.





*Kuva 3. Rataosuus Kouvola-Luumäki, raide 1, km 230+180.  
Mitattu rakeisuusluku kohdassa on 65.*

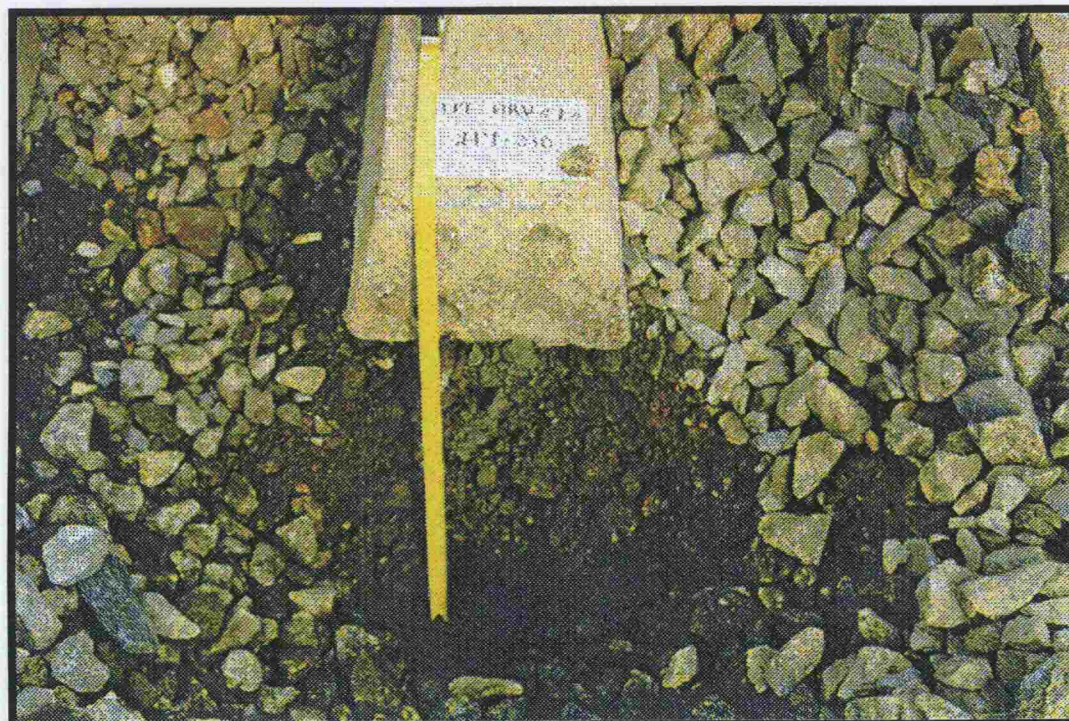


*Kuva 4. Rataosuus Kouvola-Luumäki, raide 2, km 230+180.  
Mitattu Rakeisuusluku kohdassa on 42.*





Kuva 5. Rataosuus Tampere-Orivesi, raide 1, km 212+370.  
Mitattu rakeisuusluku kohdassa on 88.



Kuva 6. Rataosuus Tampere-Orivesi, raide 1, km 214+030.  
Mitattu rakeisuusluku kohdassa on 103.





Kuva 7. Rataosuus Tampere-Orivesi, raide 1, km 194+510. Mitattu rakeisuusluku kohdassa on 98.



Kuva 8. Rataosuus Tampere-Orivesi, raide 1, km 205+100. Tukikerroksen alla on routalevyt, joten tukikerros on todennäköisesti puhdistettu. Mitattu rakeisuusluku on 35.





*Kuva 9. Soralta näyttävää hienoainesta ratapölkyn alapinnan tasolta alaspäin Tampere-Orivesi rataosuudella.*

## **LIITE 2**

### **Rakeisuuslukututkimuksen tulokset ja rakeisuuskäyrät**



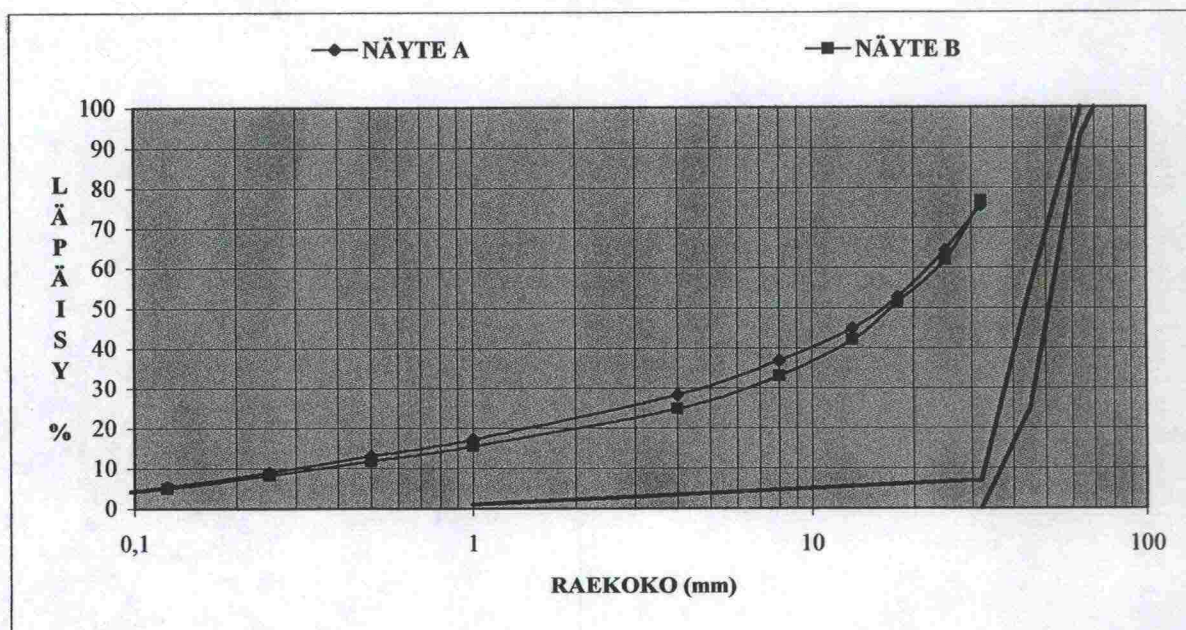
|                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| <b>Rataosuus:</b>      | <b>Jämsänkoski - Jyväskylä</b> |
| <b>Näytteenottokm:</b> | <b>288 + 400</b>               |
| <b>Tyyppi:</b>         | <b>Leikkaus, paljon tuettu</b> |
| <b>Paikka:</b>         | <b>Jämsänkoski</b>             |

**NÄYTE A**

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
| g           | %            |      |              |                    |
| 32          | 2072,1       | 24,4 | 75,6         |                    |
| 25          | 943,7        | 11,1 | 64,5         | 64,5               |
| 18          | 998,3        | 11,7 | 52,8         |                    |
| 13,2        | 660,7        | 7,8  | 45,0         |                    |
| 8           | 689,9        | 8,1  | 36,9         | 101,4              |
| 4           | 725,0        | 8,5  | 28,3         |                    |
| 1           | 939,0        | 11,1 | 17,3         | 118,7              |
| 0,5         | 359,9        | 4,2  | 13,0         |                    |
| 0,25        | 343,4        | 4,0  | 9,0          |                    |
| 0,125       | 305,3        | 3,6  | 5,4          |                    |
| 0,068       | 194,8        | 2,3  | 3,1          |                    |
| POHJA       | 257,9        | 3,1  |              | <b>118,7</b>       |
| HUKKA       | 7,5          |      |              |                    |
| YHT.        | 8497,5       |      | 100,0        |                    |

**NÄYTE B**

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
| g           | %            |      |              |                    |
| 32          | 1814,6       | 23,1 | 76,9         |                    |
| 25          | 1165,3       | 14,9 | 62,0         | 62,0               |
| 18          | 825,0        | 10,5 | 51,5         |                    |
| 13,2        | 746,5        | 9,5  | 42,0         |                    |
| 8           | 704,9        | 9,0  | 33,0         | 95,0               |
| 4           | 635,0        | 8,1  | 24,9         |                    |
| 1           | 743,6        | 9,5  | 15,4         | 110,3              |
| 0,5         | 285,5        | 3,6  | 11,7         |                    |
| 0,25        | 276,1        | 3,5  | 8,2          |                    |
| 0,125       | 249,3        | 3,2  | 5,0          |                    |
| 0,068       | 167,4        | 2,1  | 2,9          |                    |
| POHJA       | 220,3        | 2,9  |              | <b>110,3</b>       |
| HUKKA       | 7,8          |      |              |                    |
| YHT.        | 7841,3       |      | 100,0        |                    |



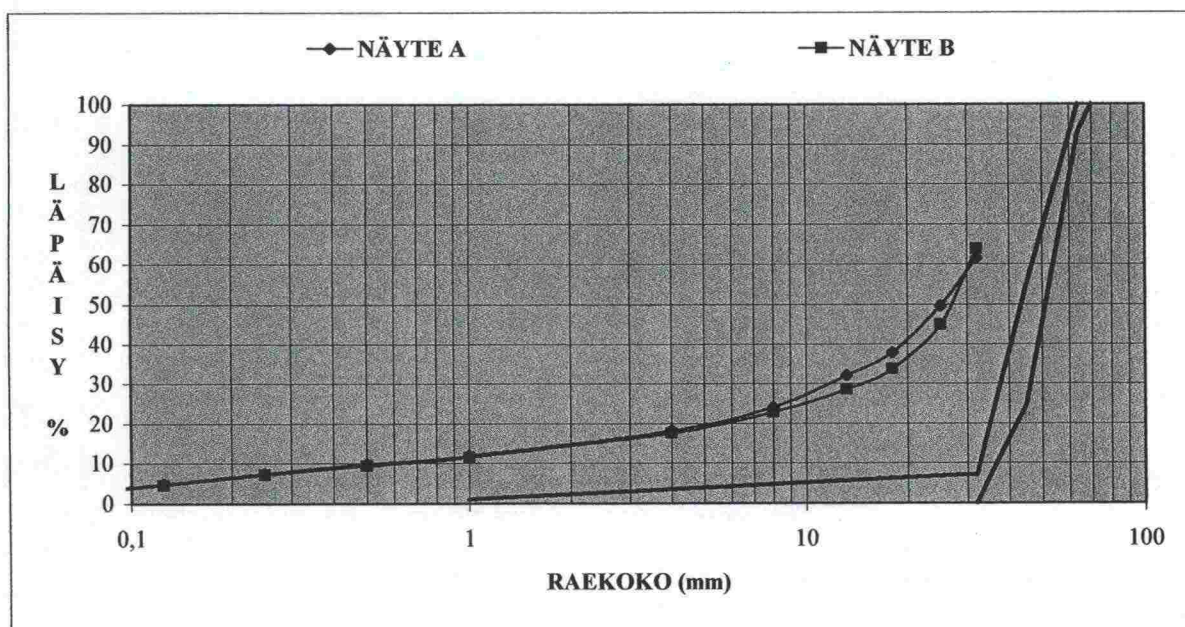
|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä |
| Näytteenottomk: | 292 +300                |
| Tyyppi:         | Leikkaus, vähän tuettu  |
| Paikka:         | Harjunkangas            |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
|             | g            | %    |              |                    |
| 32          | 3118,3       | 38,4 | 61,6         |                    |
| 25          | 968,3        | 11,9 | 49,6         | 49,6               |
| 18          | 946,3        | 11,7 | 38,0         |                    |
| 13,2        | 468,8        | 5,8  | 32,2         |                    |
| 8           | 654,8        | 8,1  | 24,1         | 73,7               |
| 4           | 480,2        | 5,9  | 18,2         |                    |
| 1           | 507,9        | 6,3  | 11,9         | 85,6               |
| 0,5         | 175,4        | 2,2  | 9,8          |                    |
| 0,25        | 194,2        | 2,4  | 7,4          |                    |
| 0,125       | 202,2        | 2,5  | 4,9          |                    |
| 0,068       | 147,0        | 1,8  | 3,1          |                    |
| POHJA       | 212,7        | 3,1  |              | 85,6               |
| HUKKA       | 35,7         |      |              |                    |
| YHT.        | 8111,8       |      | 100,0        |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
|             | g            | %    |              |                    |
| 32          | 3488,7       | 36,2 | 63,8         |                    |
| 25          | 1804,6       | 18,7 | 45,0         | 45,0               |
| 18          | 1083,0       | 11,3 | 33,8         |                    |
| 13,2        | 496,6        | 5,2  | 28,6         |                    |
| 8           | 550,4        | 5,7  | 22,9         | 67,9               |
| 4           | 516,0        | 5,4  | 17,5         |                    |
| 1           | 585,1        | 6,1  | 11,4         | 79,3               |
| 0,5         | 202,5        | 2,1  | 9,3          |                    |
| 0,25        | 221,6        | 2,3  | 7,0          |                    |
| 0,125       | 242,0        | 2,5  | 4,5          |                    |
| 0,068       | 187,6        | 1,9  | 2,6          |                    |
| POHJA       | 238,3        | 2,6  |              | 79,3               |
| HUKKA       | 8,5          |      |              |                    |
| YHT.        | 9624,9       |      | 100,0        |                    |





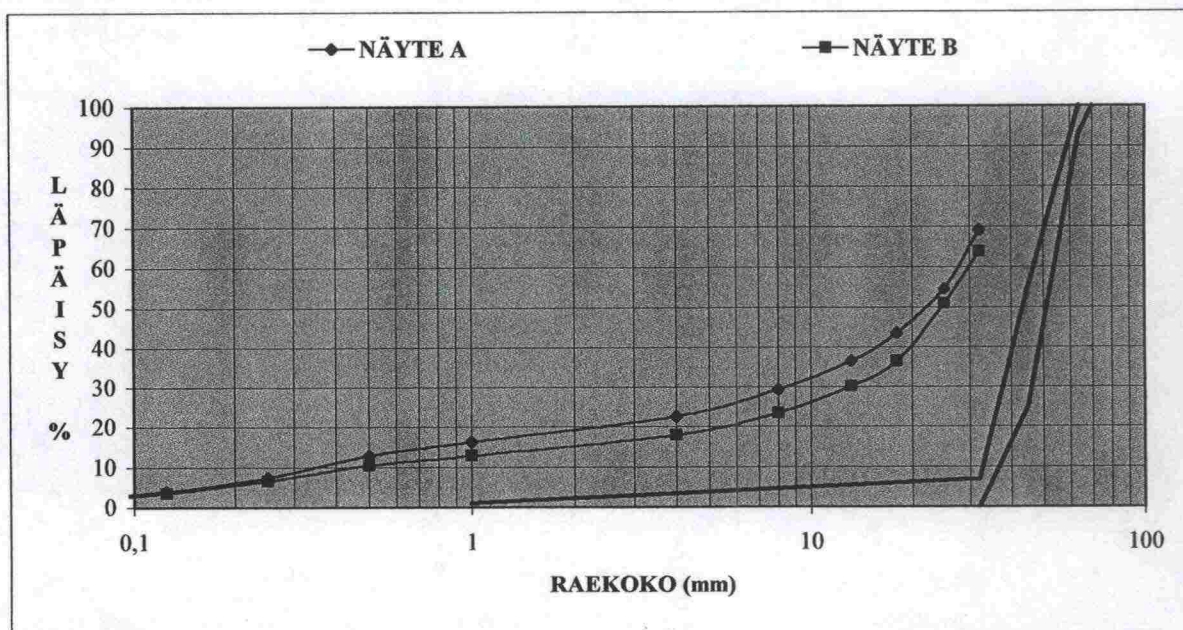
|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä |
| Näytteenottokm: | 300 +950                |
| Tyyppi:         | Penger, paljon tuettu   |
| Paikka:         | Rasila                  |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 2409,1       | 30,7  | 69,3         |                    |
| 25          | 1146,0       | 14,6  | 54,6         | 54,6               |
| 18          | 867,8        | 11,1  | 43,6         |                    |
| 13,2        | 547,0        | 7,0   | 36,6         |                    |
| 8           | 570,6        | 7,3   | 29,3         | 83,9               |
| 4           | 525,8        | 6,7   | 22,6         |                    |
| 1           | 498,2        | 6,4   | 16,2         | 100,1              |
| 0,5         | 257,4        | 3,3   | 12,9         |                    |
| 0,25        | 428,7        | 5,5   | 7,5          |                    |
| 0,125       | 267,8        | 3,4   | 4,0          |                    |
| 0,068       | 125,7        | 1,6   | 2,4          |                    |
| POHJA       | 142,3        | 2,4   |              | 100,1              |
| HUKKA       | 49,2         |       |              |                    |
| YHT.        | 7835,6       | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 3313,9       | 36,1  | 63,9         |                    |
| 25          | 1203,1       | 13,1  | 50,8         | 50,8               |
| 18          | 1332,5       | 14,5  | 36,3         |                    |
| 13,2        | 572,0        | 6,2   | 30,1         |                    |
| 8           | 628,1        | 6,8   | 23,3         | 74,1               |
| 4           | 490,0        | 5,3   | 17,9         |                    |
| 1           | 466,5        | 5,1   | 12,9         | 87,0               |
| 0,5         | 221,2        | 2,4   | 10,5         |                    |
| 0,25        | 360,6        | 3,9   | 6,5          |                    |
| 0,125       | 269,8        | 2,9   | 3,6          |                    |
| 0,068       | 147,5        | 1,6   | 2,0          |                    |
| POHJA       | 175,4        | 2,0   |              | 87,0               |
| HUKKA       | 7,6          |       |              |                    |
| YHT.        | 9188,2       | 100,0 |              |                    |



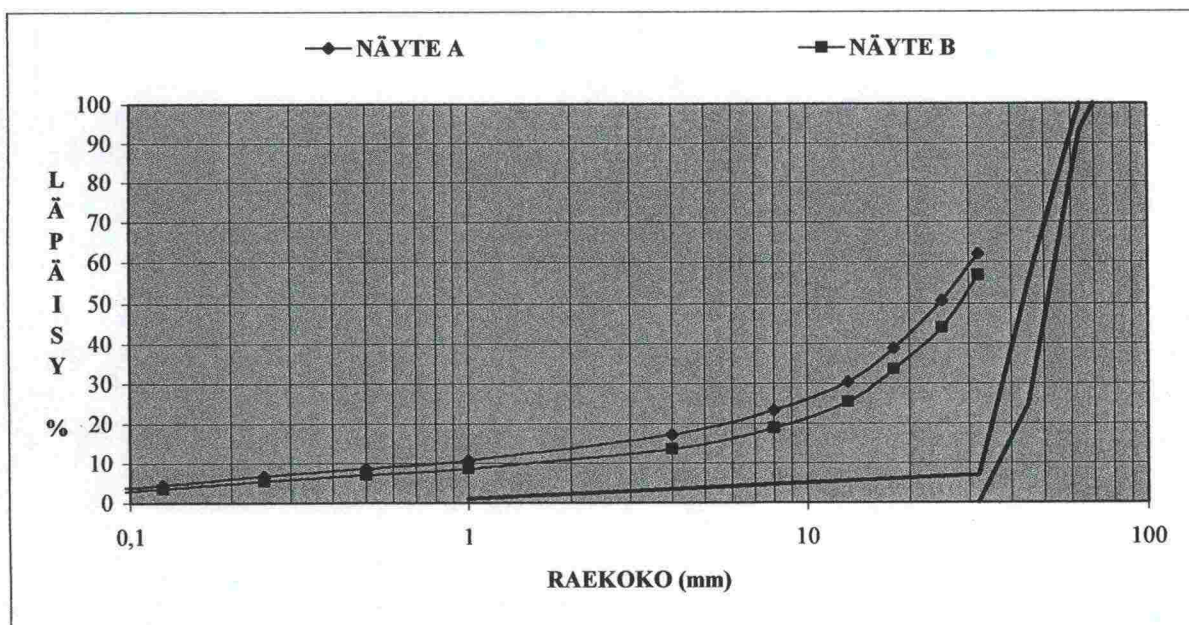
|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä |
| Näytteenottokm: | 314 +610                |
| Tyyppi:         | Penger, vähän tuettu    |
| Paikka:         | Korpilahti              |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 2963,5       | 37,8  | 62,2         |                    |
| 25          | 906,4        | 11,6  | 50,7         | 50,7               |
| 18          | 928,2        | 11,8  | 38,8         |                    |
| 13,2        | 655,7        | 8,4   | 30,5         |                    |
| 8           | 555,9        | 7,1   | 23,4         | 74,0               |
| 4           | 484,5        | 6,2   | 17,2         |                    |
| 1           | 497,8        | 6,3   | 10,8         | 84,9               |
| 0,5         | 163,1        | 2,1   | 8,8          |                    |
| 0,25        | 160,5        | 2,0   | 6,7          |                    |
| 0,125       | 169,3        | 2,2   | 4,6          |                    |
| 0,068       | 133,1        | 1,7   | 2,9          |                    |
| POHJA       | 190,7        | 2,9   |              | 84,9               |
| HUKKA       | 33,6         |       |              |                    |
| YHT.        | 7842,3       | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 4449,7       | 43,2  | 56,8         |                    |
| 25          | 1329,8       | 12,9  | 43,9         | 43,9               |
| 18          | 1080,7       | 10,5  | 33,4         |                    |
| 13,2        | 829,7        | 8,0   | 25,4         |                    |
| 8           | 674,3        | 6,5   | 18,9         | 62,8               |
| 4           | 544,6        | 5,3   | 13,6         |                    |
| 1           | 502,6        | 4,9   | 8,7          | 71,5               |
| 0,5         | 163,4        | 1,6   | 7,1          |                    |
| 0,25        | 169,6        | 1,6   | 5,5          |                    |
| 0,125       | 194,1        | 1,9   | 3,6          |                    |
| 0,068       | 147,9        | 1,4   | 2,1          |                    |
| POHJA       | 216,4        | 2,1   |              | 71,5               |
| HUKKA       | 5,1          |       |              |                    |
| YHT.        | 10307,9      | 100,0 |              |                    |





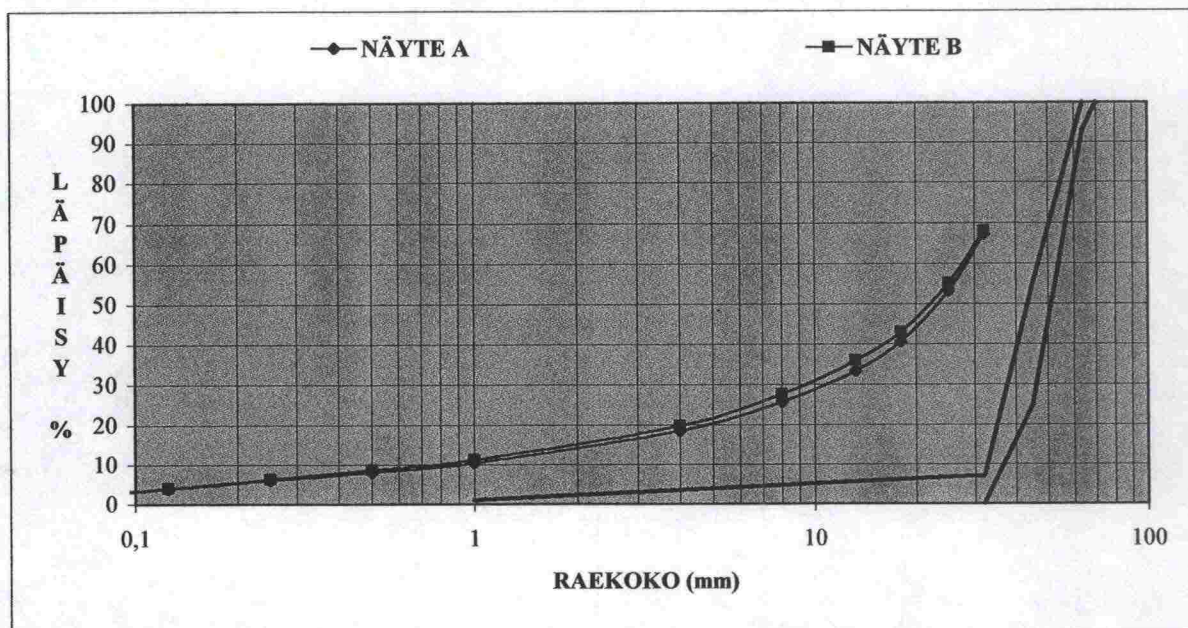
|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä   |
| Näytteenottomk: | 299 + 244                 |
| Tyyppi:         | Sillan pää, paljon tuettu |
| Paikka:         | Myllylampi                |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 3068,6       | 32,6  | 67,4         |                    |
| 25          | 1330,5       | 14,1  | 53,3         | 53,3               |
| 18          | 1190,7       | 12,6  | 40,6         |                    |
| 13,2        | 678,0        | 7,2   | 33,4         |                    |
| 8           | 720,2        | 7,6   | 25,8         | 79,1               |
| 4           | 682,2        | 7,2   | 18,5         |                    |
| 1           | 762,2        | 8,1   | 10,4         | 89,5               |
| 0,5         | 225,0        | 2,4   | 8,0          |                    |
| 0,25        | 198,3        | 2,1   | 5,9          |                    |
| 0,125       | 200,0        | 2,1   | 3,8          |                    |
| 0,068       | 157,0        | 1,7   | 2,1          |                    |
| POHJA       | 195,8        | 2,1   |              | 89,5               |
| HUKKA       | 6,5          |       |              |                    |
| YHT.        | 9415,0       | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 2808,2       | 32,0  | 68,0         |                    |
| 25          | 1124,5       | 12,8  | 55,2         | 55,2               |
| 18          | 1068,7       | 12,2  | 43,0         |                    |
| 13,2        | 623,5        | 7,1   | 35,9         |                    |
| 8           | 726,4        | 8,3   | 27,7         | 82,9               |
| 4           | 699,8        | 8,0   | 19,7         |                    |
| 1           | 741,1        | 8,4   | 11,3         | 94,2               |
| 0,5         | 229,9        | 2,6   | 8,7          |                    |
| 0,25        | 204,0        | 2,3   | 6,3          |                    |
| 0,125       | 196,0        | 2,2   | 4,1          |                    |
| 0,068       | 148,6        | 1,7   | 2,4          |                    |
| POHJA       | 202,7        | 2,4   |              | 94,2               |
| HUKKA       | 8,5          |       |              |                    |
| YHT.        | 8781,9       | 100,0 |              |                    |



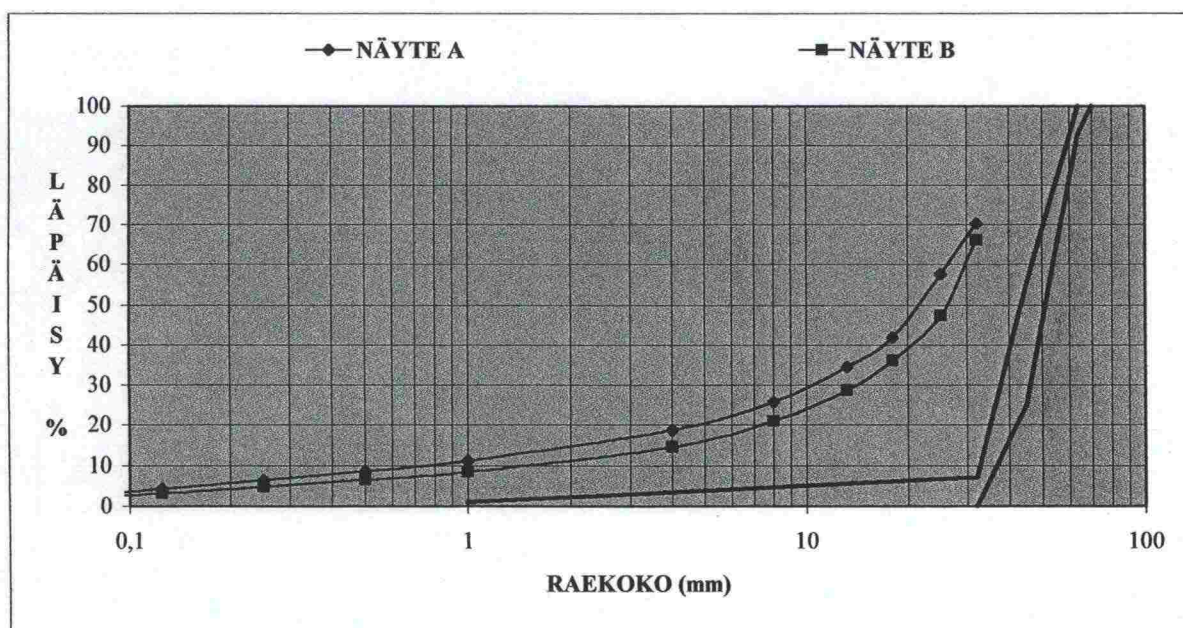
|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| <b>Rataosuus:</b>      | <b>Jämsänkoski - Jyväskylä</b>  |
| <b>Näytteenottokm:</b> | <b>314 +746</b>                 |
| <b>Tyyppi:</b>         | <b>Sillan pää, vähän tuettu</b> |
| <b>Paikka:</b>         | <b>Riitamaa</b>                 |

**NÄYTE A**

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
| g           | %            |      |              |                    |
| 32          | 2457,5       | 29,8 | 70,2         |                    |
| 25          | 1037,0       | 12,6 | 57,7         | 57,7               |
| 18          | 1305,3       | 15,8 | 41,9         |                    |
| 13,2        | 610,4        | 7,4  | 34,5         |                    |
| 8           | 714,4        | 8,7  | 25,8         | 83,5               |
| 4           | 578,7        | 7,0  | 18,8         |                    |
| 1           | 620,3        | 7,5  | 11,3         | 94,8               |
| 0,5         | 212,5        | 2,6  | 8,7          |                    |
| 0,25        | 187,5        | 2,3  | 6,4          |                    |
| 0,125       | 179,8        | 2,2  | 4,3          |                    |
| 0,068       | 139,2        | 1,7  | 2,6          |                    |
| POHJA       | 207,0        | 2,6  |              | <b>94,8</b>        |
| HUKKA       | 5,5          |      |              |                    |
| YHT.        | 8255,1       |      | 100,0        |                    |

**NÄYTE B**

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
| g           | %            |      |              |                    |
| 32          | 2415,4       | 33,9 | 66,1         |                    |
| 25          | 1328,2       | 18,7 | 47,4         | 47,4               |
| 18          | 803,5        | 11,3 | 36,1         |                    |
| 13,2        | 521,2        | 7,3  | 28,8         |                    |
| 8           | 558,4        | 7,8  | 20,9         | 68,4               |
| 4           | 451,9        | 6,3  | 14,6         |                    |
| 1           | 437,7        | 6,1  | 8,5          | 76,8               |
| 0,5         | 134,1        | 1,9  | 6,6          |                    |
| 0,25        | 120,3        | 1,7  | 4,9          |                    |
| 0,125       | 113,9        | 1,6  | 3,3          |                    |
| 0,068       | 87,9         | 1,2  | 2,0          |                    |
| POHJA       | 141,2        | 2,0  |              | <b>76,8</b>        |
| HUKKA       | 4,2          |      |              |                    |
| YHT.        | 7117,9       |      | 100,0        |                    |





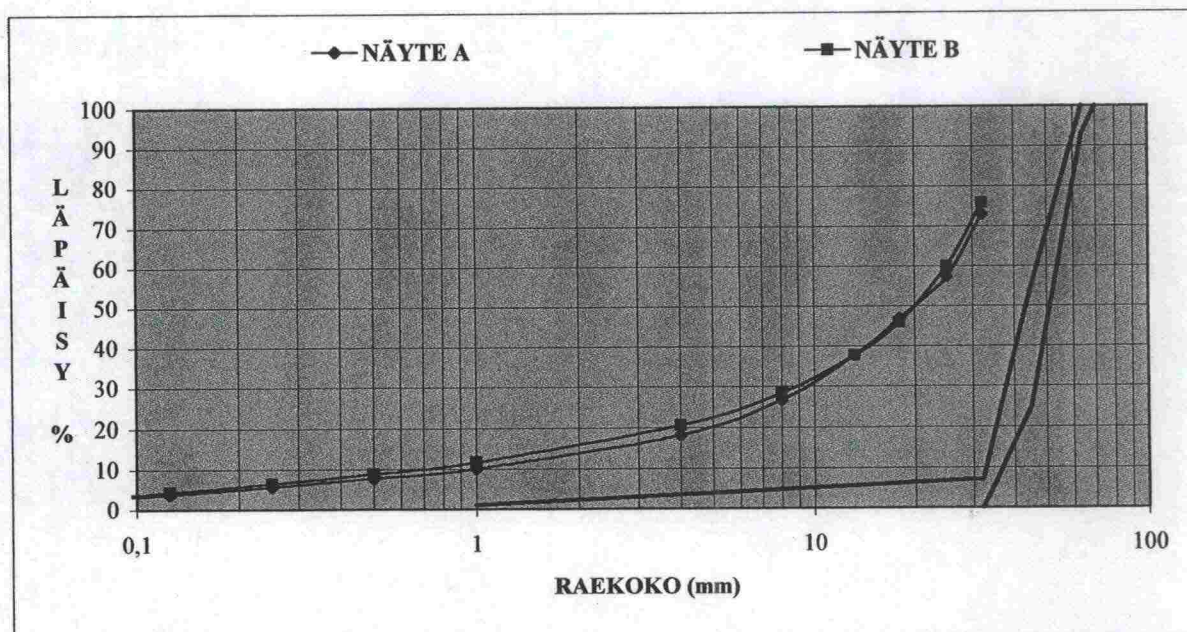
|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä |
| Näytteenottokm: | 325 + 744               |
| Tyyppi:         | Silta, paljon tuettu    |
| Paikka:         | Uusipitkälä             |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 2508,9       | 27,1  | 72,9         |                    |
| 25          | 1438,7       | 15,5  | 57,4         | 57,4               |
| 18          | 967,3        | 10,4  | 46,9         |                    |
| 13,2        | 853,5        | 9,2   | 37,7         |                    |
| 8           | 1022,5       | 11,0  | 26,7         | 84,1               |
| 4           | 784,8        | 8,5   | 18,2         |                    |
| 1           | 750,1        | 8,1   | 10,1         | 94,2               |
| 0,5         | 226,8        | 2,4   | 7,7          |                    |
| 0,25        | 193,5        | 2,1   | 5,6          |                    |
| 0,125       | 169,5        | 1,8   | 3,8          |                    |
| 0,068       | 128,2        | 1,4   | 2,4          |                    |
| POHJA       | 215,6        | 2,4   |              | 94,2               |
| HUKKA       | 4,3          |       |              |                    |
| YHT.        | 9263,7       | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 2667,5       | 24,1  | 75,9         |                    |
| 25          | 1763,0       | 15,9  | 60,0         | 60,0               |
| 18          | 1554,3       | 14,0  | 46,0         |                    |
| 13,2        | 906,6        | 8,2   | 37,8         |                    |
| 8           | 1039,0       | 9,4   | 28,4         | 88,4               |
| 4           | 861,7        | 7,8   | 20,6         |                    |
| 1           | 985,1        | 8,9   | 11,7         | 100,2              |
| 0,5         | 318,8        | 2,9   | 8,9          |                    |
| 0,25        | 269,3        | 2,4   | 6,4          |                    |
| 0,125       | 235,2        | 2,1   | 4,3          |                    |
| 0,068       | 168,7        | 1,5   | 2,8          |                    |
| POHJA       | 296,2        | 2,8   |              | 100,2              |
| HUKKA       | 13,1         |       |              |                    |
| YHT.        | 11078,5      | 100,0 |              |                    |



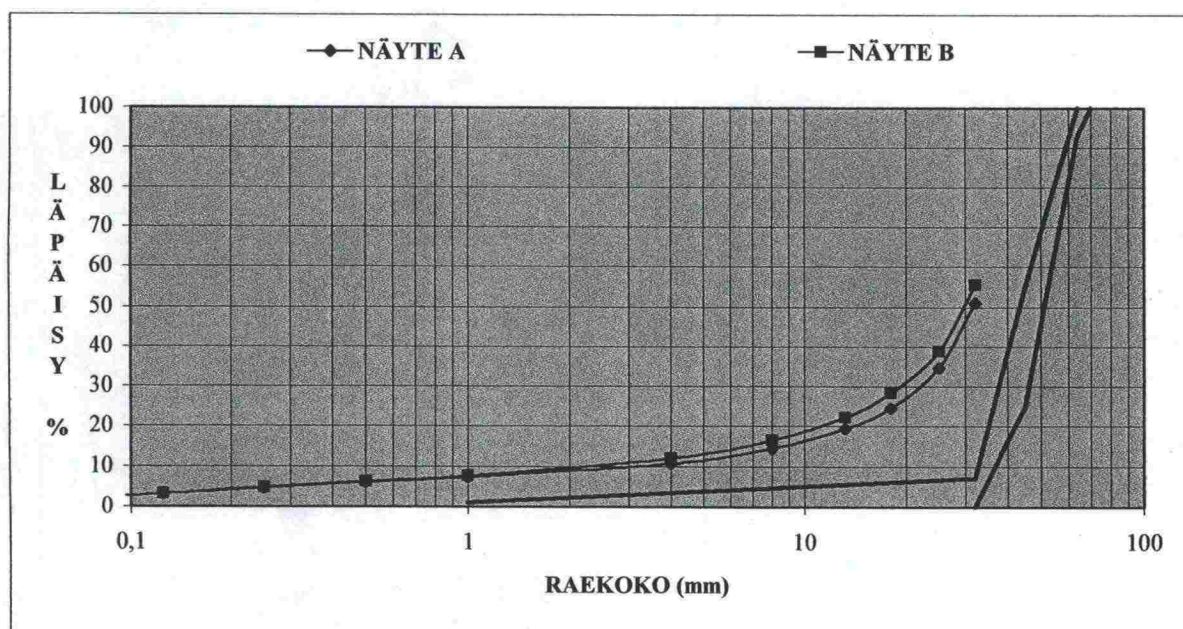
|                 |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä           |
| Näytteenottokm: | 303 +582                          |
| Tyyppi:         | Silta, vähän tuettu ( puupölkyt ) |
| Paikka:         | Uusipitkälä                       |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 5949,9       | 48,9  | 51,1         |                    |
| 25          | 2000,5       | 16,5  | 34,6         | 34,6               |
| 18          | 1228,8       | 10,1  | 24,5         |                    |
| 13,2        | 609,8        | 5,0   | 19,5         |                    |
| 8           | 607,7        | 5,0   | 14,5         | 49,1               |
| 4           | 451,1        | 3,7   | 10,8         |                    |
| 1           | 420,2        | 3,5   | 7,3          | 56,4               |
| 0,5         | 152,9        | 1,3   | 6,1          |                    |
| 0,25        | 170,7        | 1,4   | 4,7          |                    |
| 0,125       | 184,3        | 1,5   | 3,1          |                    |
| 0,068       | 143,3        | 1,2   | 2,0          |                    |
| POHJA       | 226,0        | 2,0   |              | 56,4               |
| HUKKA       | 12,7         |       |              |                    |
| YHT.        | 12157,9      | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 5138,2       | 44,4  | 55,6         |                    |
| 25          | 1934,1       | 16,7  | 38,9         | 38,9               |
| 18          | 1214,5       | 10,5  | 28,4         |                    |
| 13,2        | 711,2        | 6,1   | 22,3         |                    |
| 8           | 671,3        | 5,8   | 16,5         | 55,4               |
| 4           | 512,7        | 4,4   | 12,0         |                    |
| 1           | 492,5        | 4,3   | 7,8          | 63,1               |
| 0,5         | 171,0        | 1,5   | 6,3          |                    |
| 0,25        | 176,5        | 1,5   | 4,8          |                    |
| 0,125       | 183,0        | 1,6   | 3,2          |                    |
| 0,068       | 139,5        | 1,2   | 2,0          |                    |
| POHJA       | 217,0        | 2,0   |              | 63,1               |
| HUKKA       | 12,7         |       |              |                    |
| YHT.        | 11574,2      | 100,0 |              |                    |





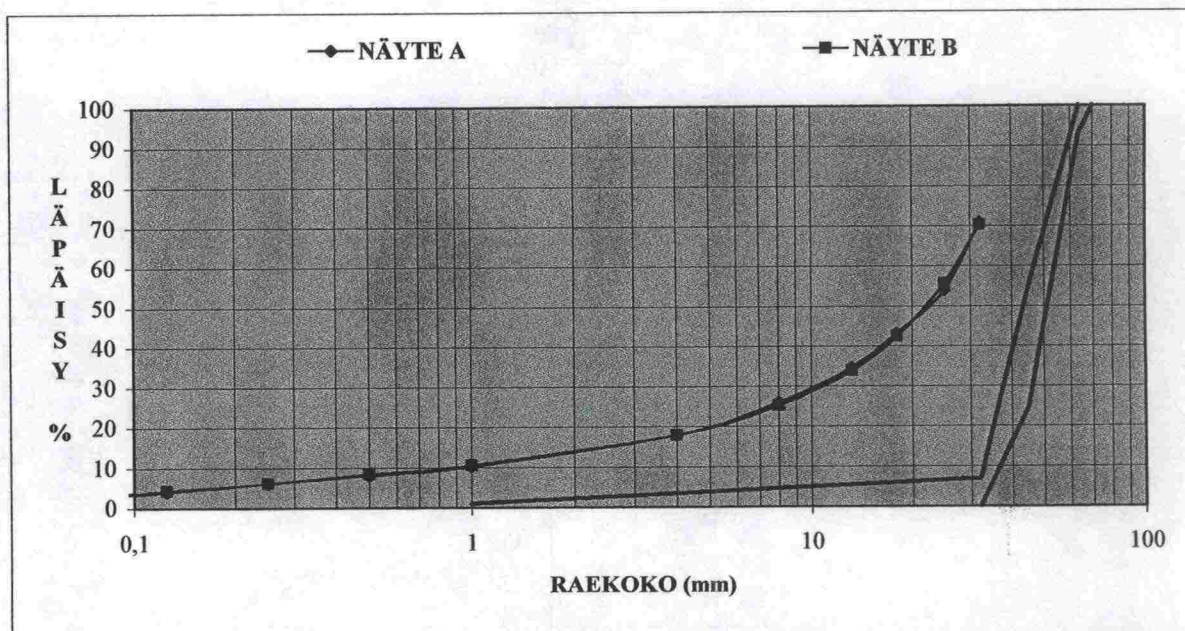
|                |                             |
|----------------|-----------------------------|
| Rataosuus:     | Jämsänkoski - Jyväskylä     |
| Näytteenottom: | 315 +994                    |
| Tyyppi:        | Tunnelin suu, paljon tuettu |
| Paikka:        | Sahinmäki, eteläpää         |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 3415,8       | 29,0  | 71,0         |                    |
| 25          | 1999,7       | 17,0  | 54,0         | 54,0               |
| 18          | 1268,9       | 10,8  | 43,2         |                    |
| 13,2        | 1004,9       | 8,5   | 34,6         |                    |
| 8           | 1013,9       | 8,6   | 26,0         | 80,0               |
| 4           | 951,8        | 8,1   | 17,9         |                    |
| 1           | 888,6        | 7,6   | 10,4         | 90,3               |
| 0,5         | 267,0        | 2,3   | 8,1          |                    |
| 0,25        | 239,8        | 2,0   | 6,0          |                    |
| 0,125       | 229,8        | 2,0   | 4,1          |                    |
| 0,068       | 180,2        | 1,5   | 2,6          |                    |
| POHJA       | 273,5        | 2,6   |              | 90,3               |
| HUKKA       | 28,1         |       |              |                    |
| YHT.        | 11762,0      | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 2773,0       | 29,6  | 70,4         |                    |
| 25          | 1378,3       | 14,7  | 55,7         | 55,7               |
| 18          | 1254,1       | 13,4  | 42,3         |                    |
| 13,2        | 788,4        | 8,4   | 33,9         |                    |
| 8           | 816,9        | 8,7   | 25,1         | 80,8               |
| 4           | 676,8        | 7,2   | 17,9         |                    |
| 1           | 686,9        | 7,3   | 10,6         | 91,4               |
| 0,5         | 213,1        | 2,3   | 8,3          |                    |
| 0,25        | 196,7        | 2,1   | 6,2          |                    |
| 0,125       | 177,7        | 1,9   | 4,3          |                    |
| 0,068       | 143,5        | 1,5   | 2,8          |                    |
| POHJA       | 228,8        | 2,8   |              | 91,4               |
| HUKKA       | 30,0         |       |              |                    |
| YHT.        | 9364,2       | 100,0 |              |                    |



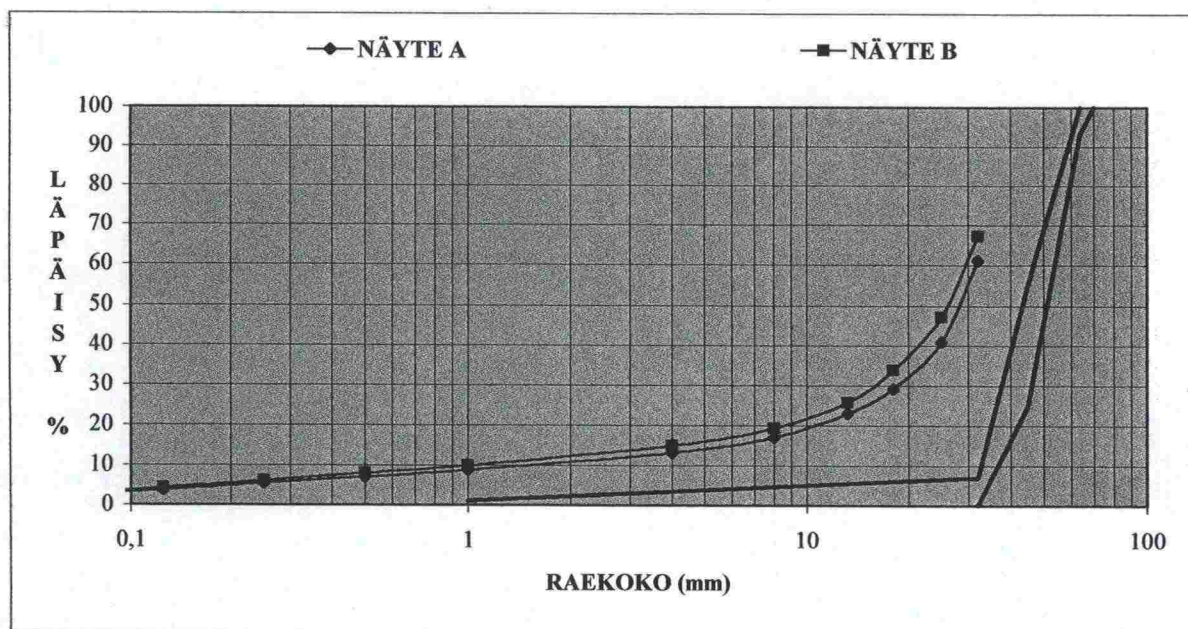
|                 |                            |
|-----------------|----------------------------|
| Rataosuus:      | Jämsänkoski - Jyväskylä    |
| Näytteenottokm: | 308 +160                   |
| Tyyppi:         | Tunnelin suu, vähän tuettu |
| Paikka:         | Lahdenvuori, eteläpää      |

NÄYTE A

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 3664,0       | 38,9  | 61,1         |                    |
| 25          | 1901,9       | 20,2  | 40,9         | 40,9               |
| 18          | 1107,2       | 11,8  | 29,2         |                    |
| 13,2        | 580,7        | 6,2   | 23,0         |                    |
| 8           | 554,9        | 5,9   | 17,1         | 58,0               |
| 4           | 363,8        | 3,9   | 13,3         |                    |
| 1           | 419,1        | 4,4   | 8,8          | 66,9               |
| 0,5         | 160,6        | 1,7   | 7,1          |                    |
| 0,25        | 161,0        | 1,7   | 5,4          |                    |
| 0,125       | 155,2        | 1,6   | 3,8          |                    |
| 0,068       | 128,2        | 1,4   | 2,4          |                    |
| POHJA       | 217,6        | 2,4   |              | 66,9               |
| HUKKA       | 7,7          |       |              |                    |
| YHT.        | 9421,9       | 100,0 |              |                    |

NÄYTE B

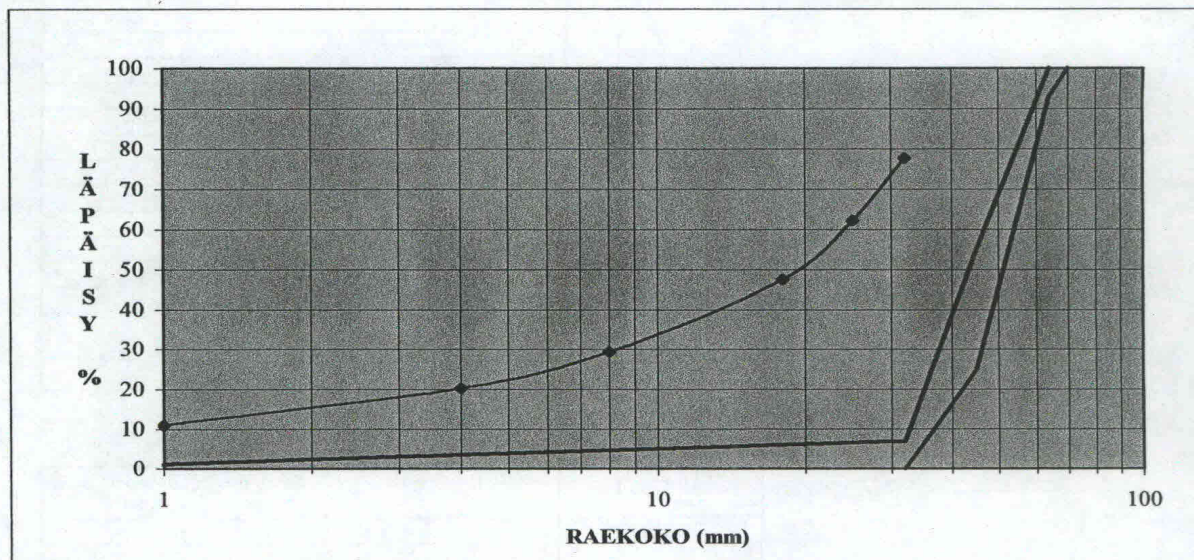
| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           | %            |       |              |                    |
| 32          | 2384,9       | 32,7  | 67,3         |                    |
| 25          | 1463,4       | 20,1  | 47,2         | 47,2               |
| 18          | 976,9        | 13,4  | 33,8         |                    |
| 13,2        | 583,4        | 8,0   | 25,8         |                    |
| 8           | 471,7        | 6,5   | 19,4         | 66,6               |
| 4           | 319,9        | 4,4   | 15,0         |                    |
| 1           | 363,8        | 5,0   | 10,0         | 76,6               |
| 0,5         | 140,5        | 1,9   | 8,1          |                    |
| 0,25        | 140,8        | 1,9   | 6,1          |                    |
| 0,125       | 136,0        | 1,9   | 4,3          |                    |
| 0,068       | 108,2        | 1,5   | 2,8          |                    |
| POHJA       | 192,5        | 2,8   |              | 76,6               |
| HUKKA       | 11,6         |       |              |                    |
| YHT.        | 7293,6       | 100,0 |              |                    |





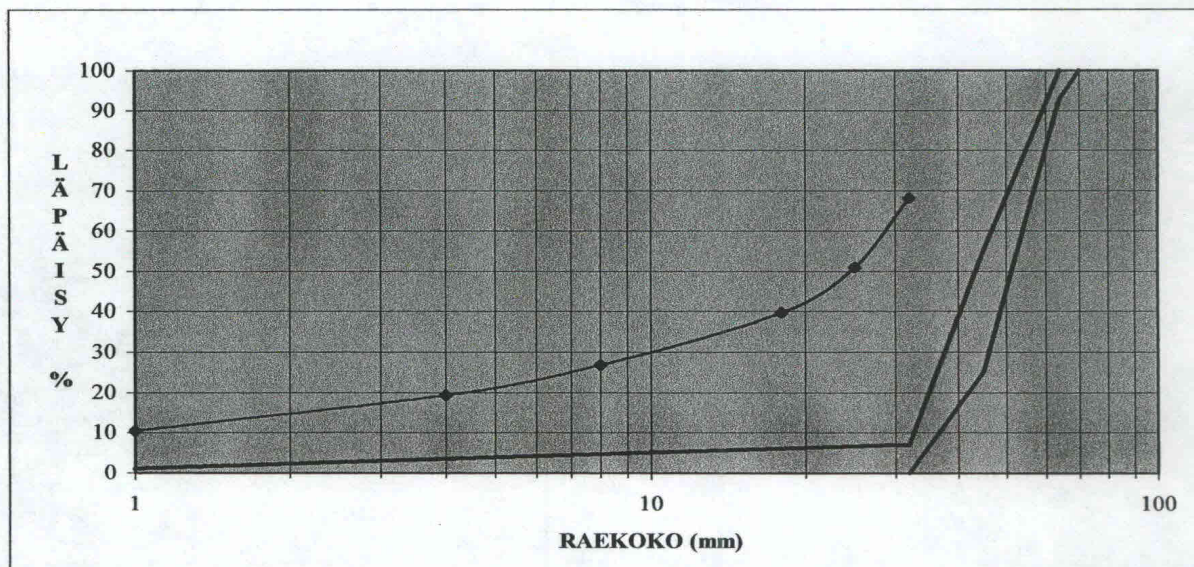
|                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| <b>Rataosuus:</b>      | <b>Tampere-Orivesi / 1</b> |
| <b>Näytteenottokm:</b> | <b>214 +030 Eteläinen</b>  |

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           |              |       |              |                    |
| 32          | 2181,2       | 22,2  | 77,8         |                    |
| 25          | 1516,4       | 15,5  | 62,3         | 62,3               |
| 18          | 1446,0       | 14,7  | 47,6         |                    |
| 8           | 1782,0       | 18,2  | 29,4         | 91,7               |
| 4           | 900,2        | 9,2   | 20,2         |                    |
| 1           | 895,9        | 9,1   | 11,1         | 102,8              |
| POHJA       | 1083,6       | 11,1  |              | <b>102,8</b>       |
| HUKKA       | 3,7          |       |              |                    |
| YHT.        | 9809,0       | 100,0 |              |                    |



|                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| <b>Rataosuus:</b>      | <b>Tampere-Orivesi / 1</b> |
| <b>Näytteenottokm:</b> | <b>212 +370 Eteläinen</b>  |

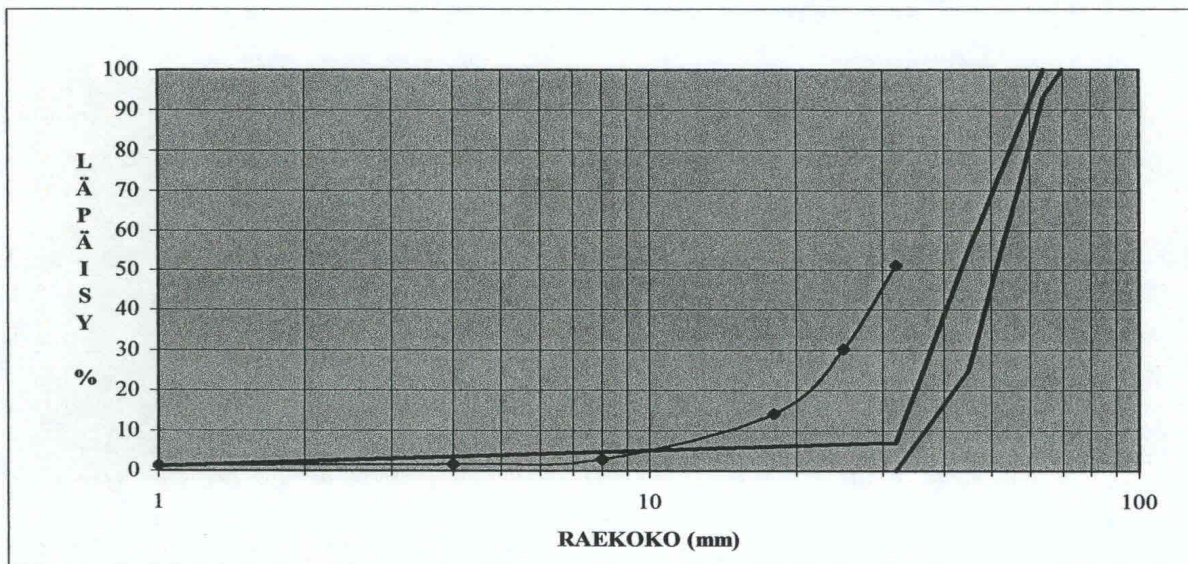
| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| g           |              |       |              |                    |
| 32          | 2787,6       | 31,7  | 68,3         |                    |
| 25          | 1517,8       | 17,3  | 51,0         | 51,0               |
| 18          | 991,1        | 11,3  | 39,7         |                    |
| 8           | 1129,6       | 12,9  | 26,8         | 77,8               |
| 4           | 658,8        | 7,5   | 19,3         |                    |
| 1           | 778,1        | 8,9   | 10,5         | 88,3               |
| POHJA       | 915,3        | 10,5  |              | <b>88,3</b>        |
| HUKKA       | 5,0          |       |              |                    |
| YHT.        | 8783,3       | 100,0 |              |                    |





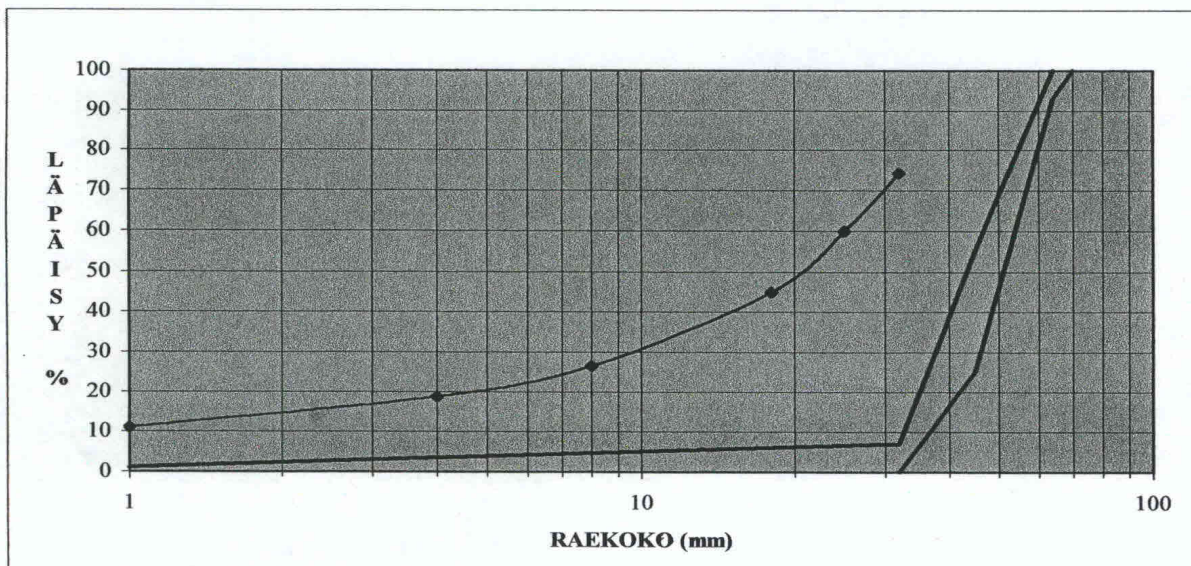
|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| Rataosuus:      | Tampere-Orivesi |
| Näytteenottokm: | 205 +100        |

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 3873,9       | 48,8  | 51,2         |                    |
| 25          | 1661,5       | 20,9  | 30,3         | 30,3               |
| 18          | 1282,9       | 16,2  | 14,1         |                    |
| 8           | 897,6        | 11,3  | 2,8          | 33,1               |
| 4           | 90,8         | 1,1   | 1,7          |                    |
| 1           | 24,0         | 0,3   | 1,4          | 34,5               |
| POHJA       | 85,3         | 1,4   |              | 34,5               |
| HUKKA       | 25,3         |       |              |                    |
| YHT.        | 7941,3       | 100,0 |              |                    |



|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| Rataosuus:      | Tampere-Orivesi |
| Näytteenottokm: | 194 +510        |

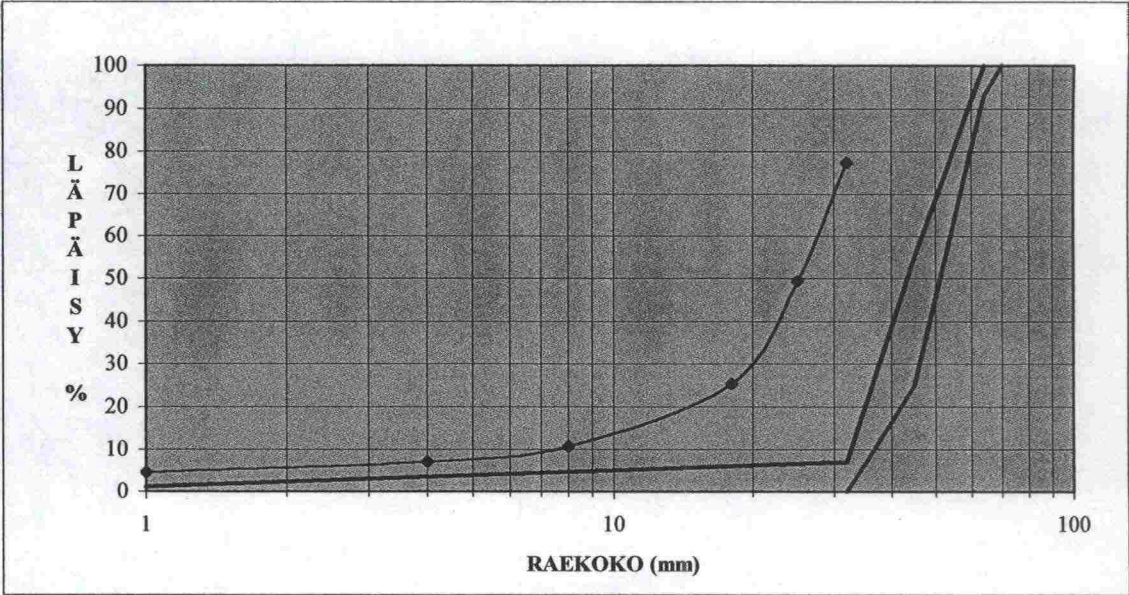
| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 2065,9       | 25,7  | 74,3         |                    |
| 25          | 1149,7       | 14,3  | 60,0         | 60,0               |
| 18          | 1209,2       | 15,0  | 45,0         |                    |
| 8           | 1486,7       | 18,5  | 26,5         | 86,5               |
| 4           | 623,8        | 7,8   | 18,7         |                    |
| 1           | 619,9        | 7,7   | 11,0         | 97,6               |
| POHJA       | 875,8        | 11,0  |              | 97,6               |
| HUKKA       | 12,0         |       |              |                    |
| YHT.        | 8043,0       | 100,0 |              |                    |





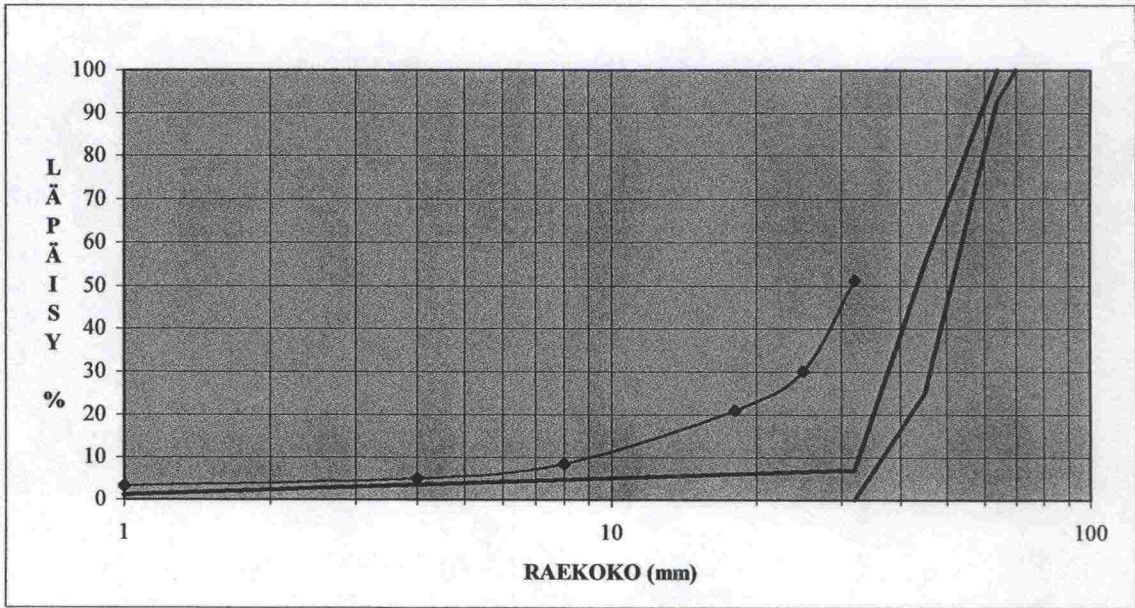
|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Rataosuus:      | Kouvola-Luumäki / 1 |
| Näytteenottokm: | 230 + 780 Eteläinen |

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 1813,9       | 22,5  | 77,5         |                    |
| 25          | 2260,9       | 28,1  | 49,4         | 49,4               |
| 18          | 1933,3       | 24,0  | 25,4         |                    |
| 8           | 1180,8       | 14,7  | 10,8         | 60,2               |
| 4           | 284,2        | 3,5   | 7,3          |                    |
| 1           | 213,7        | 2,7   | 4,6          | 64,8               |
| POHJA       | 367,8        | 4,6   |              | 64,8               |
| HUKKA       | 3,1          |       |              |                    |
| YHT.        | 8057,7       | 100,0 |              |                    |



|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Rataosuus:      | Kouvola-Luumäki / 2 |
| Näytteenottokm: | 230 +780 Pohjoinen  |

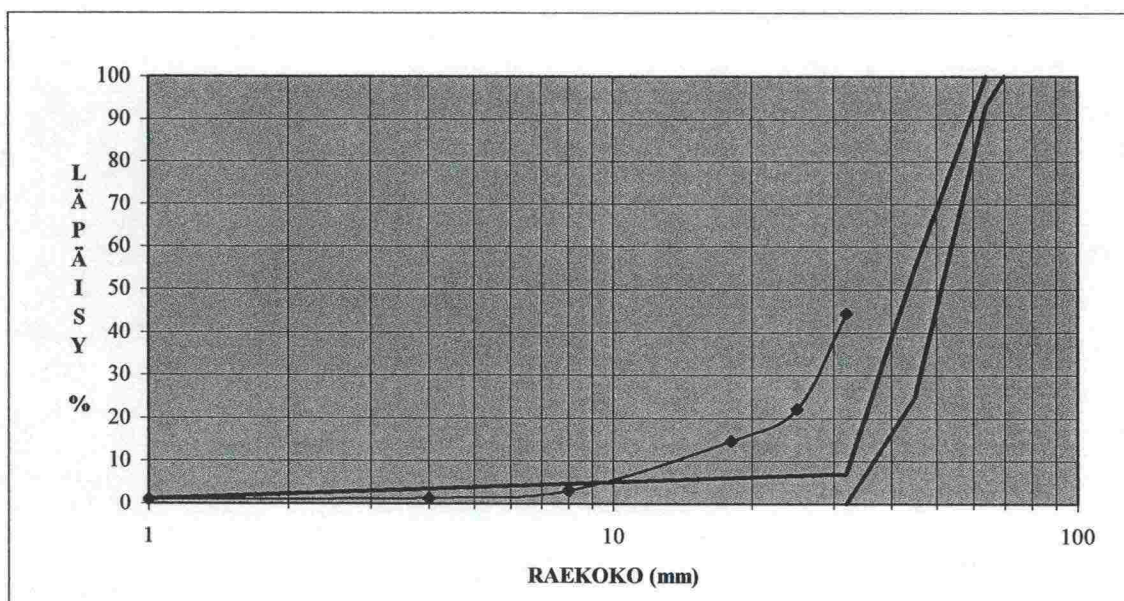
| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 4181,8       | 48,7  | 51,3         |                    |
| 25          | 1818,9       | 21,2  | 30,2         | 30,2               |
| 18          | 784,1        | 9,1   | 21,1         |                    |
| 8           | 1071,9       | 12,5  | 8,6          | 38,8               |
| 4           | 295,8        | 3,4   | 5,1          |                    |
| 1           | 162,5        | 1,9   | 3,3          | 42,0               |
| POHJA       | 277,0        | 3,3   |              | 42,0               |
| HUKKA       | 3,0          |       |              |                    |
| YHT.        | 8595,0       | 100,0 |              |                    |





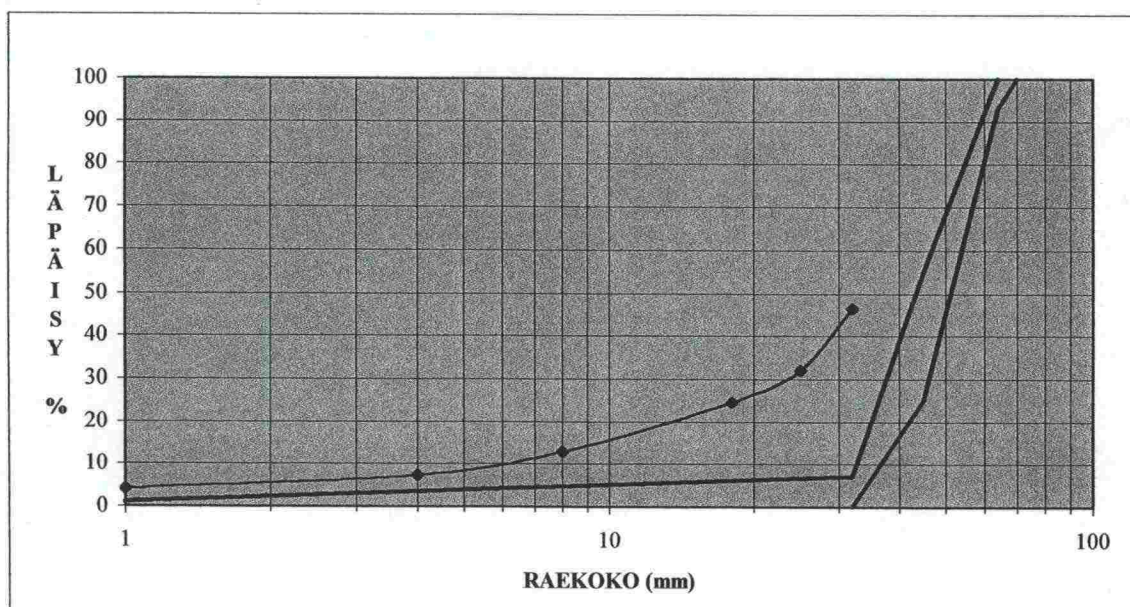
|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Rataosuus:      | Kouvola-Luumäki / 1 |
| Näytteenottokm: | 223 +830 Eteläinen  |

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 4304,7       | 55,6  | 44,4         |                    |
| 25          | 1720,0       | 22,2  | 22,2         | 22,2               |
| 18          | 573,1        | 7,4   | 14,7         |                    |
| 8           | 899,6        | 11,6  | 3,1          | 25,3               |
| 4           | 136,8        | 1,8   | 1,4          |                    |
| 1           | 25,8         | 0,3   | 1,0          | 26,3               |
| POHJA       | 79,2         | 1,0   |              | 26,3               |
| HUKKA       | -0,2         |       |              |                    |
| YHT.        | 7739,0       | 100,0 |              |                    |



|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Rataosuus:      | Kouvola-Luumäki / 2 |
| Näytteenottokm: | 223 +830 Pohjoinen  |

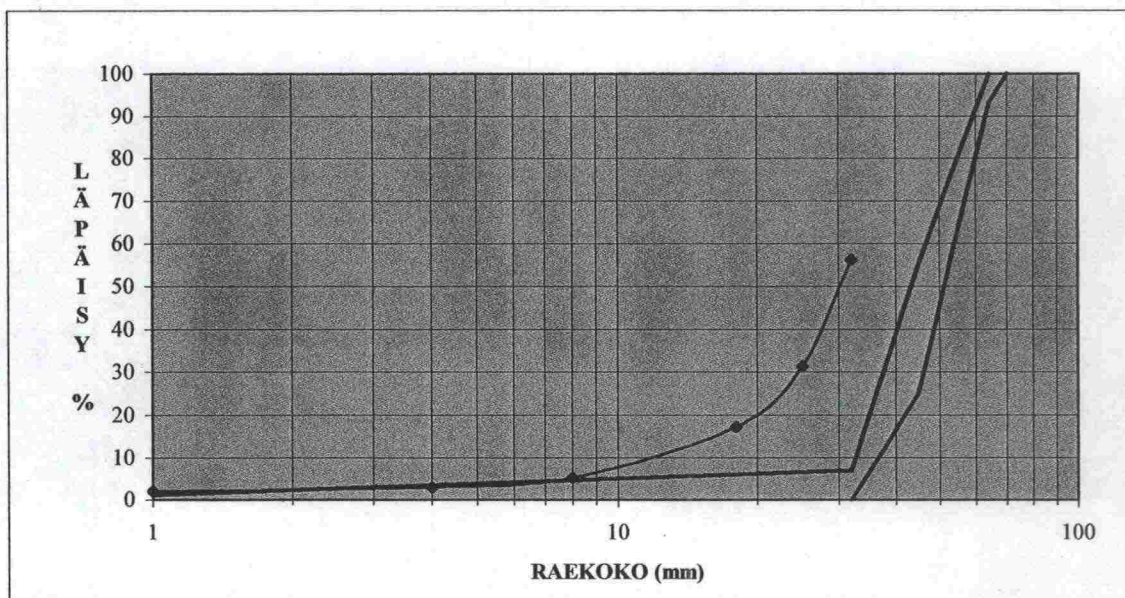
| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |       | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|-------|--------------|--------------------|
|             | g            | %     |              |                    |
| 32          | 4396,0       | 53,6  | 46,4         |                    |
| 25          | 1176,2       | 14,3  | 32,1         | 32,1               |
| 18          | 621,9        | 7,6   | 24,5         |                    |
| 8           | 950,5        | 11,6  | 13,0         | 45,1               |
| 4           | 457,5        | 5,6   | 7,4          |                    |
| 1           | 262,8        | 3,2   | 4,2          | 49,3               |
| POHJA       | 340,0        | 4,2   |              | 49,3               |
| HUKKA       | 3,5          |       |              |                    |
| YHT.        | 8208,4       | 100,0 |              |                    |





|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Rataosuus:      | Kouvola-Luumäki / 2 |
| Näytteenottokm: | 231 +880 Pohjoinen  |

| SEULA<br>mm | SEULALLE JÄI |      | LÄPÄISY<br>% | RAKEISUUS-<br>LUKU |
|-------------|--------------|------|--------------|--------------------|
|             | g            | %    |              |                    |
| 32          | 3549,3       | 43,7 | 56,3         |                    |
| 25          | 2017,1       | 24,8 | 31,5         | 31,5               |
| 18          | 1149,9       | 14,2 | 17,3         |                    |
| 8           | 965,8        | 11,9 | 5,4          | 36,8               |
| 4           | 190,9        | 2,4  | 3,0          |                    |
| 1           | 72,2         | 0,9  | 2,2          | 39,0               |
| POHJA       | 173,6        | 2,2  |              | 39,0               |
| HUKKA       | 1,5          |      |              |                    |
| YHT.        | 8120,3       |      | 100,0        |                    |



## KIVILAJIEN OSUDET LUJUUSNÄYTTEISSÄ

Näytteiden lajittelun tulokset. Seinäjoki – Kolppi rataosuudella jätettiin keskiarvon laskennassa huomiotta taulukkojen tummennettujen rivien näytteet (km 506+000 ja km 480+000). Näin toimittiin siksi, koska km 506+000 tukikerros on mitä ilmeisimmin uusittu, sillä kiviaines on kokonaan (98 %) Routakallion porfyriittiä. Km 480+000 sijaitsee rajavyöhykkeellä, johon kiviainesta on tuotu sekä Routakalliosta, että vaihtelevia määriä muualta, joten tämä kiviaines ei kuvasta Seinäjoki – Voltti osuuden keskimääräistä kiviainesta.

Seinäjoki – Kolppi:

| Km                      | Porfyriitti<br>(Routakallio) | Kiillegneissi | Karkearakeinen<br>graniitti | Pienirakeinen<br>graniitti |
|-------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>Voltti-Kolppi</b>    |                              |               |                             |                            |
| 529+000                 | 39 %                         | 33 %          | 11 %                        | 17 %                       |
| 518+000                 | 42 %                         | 49 %          | 0 %                         | 9 %                        |
| 510+600                 | 49 %                         | 37 %          | 14 %                        | 0 %                        |
| 506+000                 | 98 %                         | 0 %           | 2 %                         | 0 %                        |
| 495+000                 | 59 %                         | 34 %          | 7 %                         | 0 %                        |
| KESKIARVO               | 47 %                         | 38 %          | 8 %                         | 7 %                        |
| <b>Seinäjoki-Voltti</b> |                              |               |                             |                            |
| 480+000                 | 25 %                         | 40 %          | 11 %                        | 23 %                       |
| 463+000                 | 88 %                         | 12 %          | 0 %                         | 0 %                        |
| 449+000                 | 91 %                         | 9 %           | 0 %                         | 0 %                        |
| 428+000                 | 94 %                         | 0 %           | 6 %                         | 0 %                        |
| KESKIARVO               | 91 %                         | 7 %           | 2 %                         | 0 %                        |

Tampere – Orivesi, raide 1 (Eteläinen):

| Km        | Granodioriitti<br>(Siitama) | Hapan vulkaniitti<br>(Orivesi) | Graniitti<br>(Sorila) |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 214+030   | 100 %                       | 0 %                            | 0 %                   |
| 205+100   | 86 %                        | 12 %                           | 2 %                   |
| 194+510   | 97 %                        | 0 %                            | 3 %                   |
| KESKIARVO | 94 %                        | 4 %                            | 2 %                   |

Kouvola – Luumäki:

| Km                         | Karkearakeinen graniitti<br>(Hiillosensalmi) | Sarvivälkerapakivi | Emäksinen<br>vulkaniitti |
|----------------------------|--|--------------------|--------------------------|
| <b>Raide 1 (Eteläinen)</b> |  |                    |                          |
| 231+880 E                  | 33 %   | 63 %               | 3 %                      |
| 223+830 E                  | 87 %   | 13 %               | 0 %                      |
| 208+720 E                  | 66 %   | 27 %               | 7 %                      |
| 202+860 E                  | 89 %   | 11 %               | 0 %                      |
| KESKIARVO                  | 69 %   | 29 %               | 3 %                      |
| <b>Raide 2 (Pohjoinen)</b> |  |                    |                          |
| 231+880 P                  | 38 %   | 8 %                | 53 %                     |
| 223+830 P                  | 92 %   | 8 %                | 0 %                      |
| 208+720 P                  | 50 %   | 5 %                | 45 %                     |
| 202+860 P                  | 67 %   | 33 %               | 0 %                      |
| KESKIARVO                  | 62 %   | 14 %               | 24 %                     |



## **LIITE 4**

### **Ohuthieanalyysit**

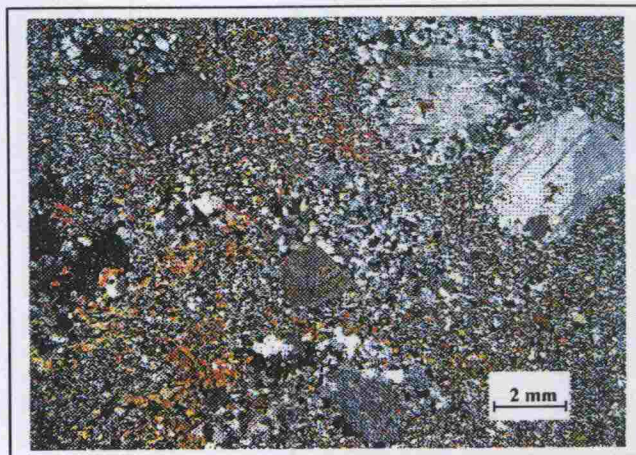
**FM Pasi Niskanen**

**10 sivua**

## SEINÄJOKI - KOKKOLA, Tukikerros

## PLAGIOKLAASIPORFYRIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 40%  |
| Sarvivälke   | 25 % |
| Kvartsi      | 20 % |
| Biotiitti    | 15 % |
| Titaniitti   | +    |
| Opaakki      | +    |
| Karbonaatit  | +    |
| Kloriitti    | +    |



Raekooltaan kivi on pieni -karkearakeinen (0.1 - 5 mm, ka 0.2 mm), mineralogialtaan kivi ei ole rapautumisaltis. Karbonaattien satunnainen esiintyminen ei vaikuta olennaisesti kiven rapautumisominaisuuksiin.

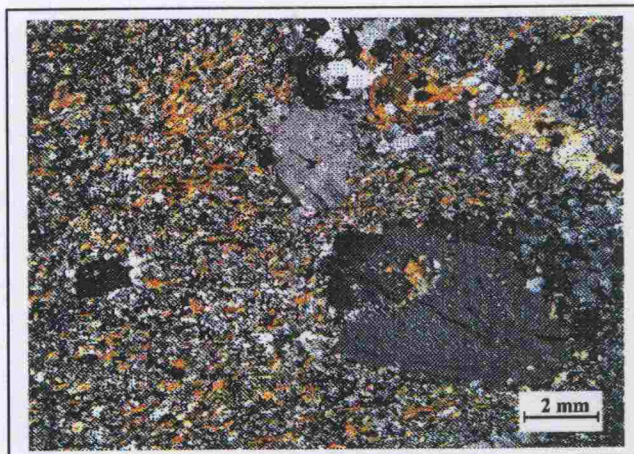
**Rakenne ja lujuus**

Kivi muodostuu pienirakeisesta perusmassasta sitä huomattavasti karkearakeisemmista plagioklaasihajarakeista. Plagioklaasihajarakeet ovat raekooltaan 1-5 mm ja perusmassa on raekooltaan noin 0.1 mm. Plagioklaasiporfyryrit ovat raerajoiltaan aaltomaisia tai lahdekkeisia ja ne esiintyvät perusmassan ympäröiminä. Paikoin esiintyy plagioklaasin ja kvartsin muodostamia raekasaumia. Pienirakeisen lujan perusmassan välityksellä ympäristöönsä liittyneet hajarakeet ja mineraalien tasainen jakauma aiheuttavat kiveen lujan rakenteen. Kvartsin vähäisyys heikentää hieman hiovan kulutuksen kestoa.

## SEINÄJOKI-KOKKOLA, Routakallion louhos

## PLAGIOKLAASIPORFYRIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 42%  |
| Sarvivälke   | 20 % |
| Kvartsi      | 30 % |
| Biotiitti    | 8 %  |
| Titaniitti   | +    |
| Opaakki      | +    |
| Karbonaatit  | +    |
| Kloriitti    | +    |



Raekooltaan kivi on pieni -karkearakeinen (0.1 - 7 mm, ka 0.3 mm), ja mineralogialtaan kivi ei ole rapautumisaltis. Karbonaattien satunnainen esiintyminen ei vaikuta olennaisesti kiven rapautumisominaisuuksiin.

**Rakenne ja lujuus**

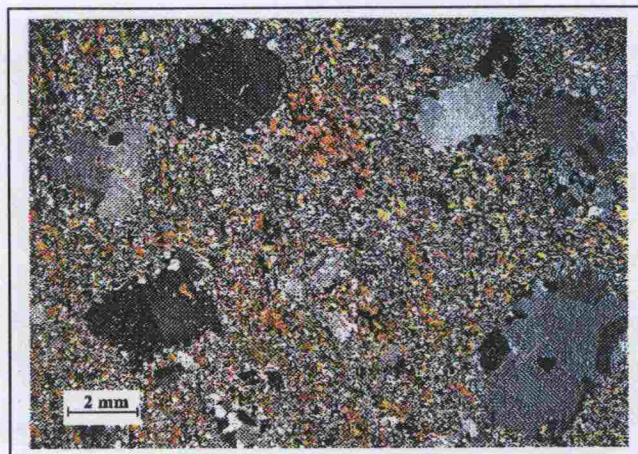
Plagioklaasihajarakeet ovat raekooltaan 1-7 mm ja perusmassa on raekooltaan noin 0.1 mm. Plagioklaasiporfyryrit, jotka saattavat koostua useasta rakeesta, ovat raerajoiltaan aaltomaisia tai lahdekkeisia ja ne esiintyvät perusmassan ympäröiminä. Pienirakeisen lujan perusmassan välityksellä ympäristöönsä liittyneet hajarakeet ja mineraalien tasainen jakauma aiheuttavat kiveen lujan rakenteen. Kvartsin pieni määrä heikentää hieman hiovan kulutuksen kestoa.



## SEINÄJOKI - KOKKOLA, Radan pinta

## PLAGIOKLAASIPORFYRIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 45%  |
| Sarvivälke   | 20 % |
| Kvartsi      | 25 % |
| Biotiitti    | 10 % |
| Titaniitti   | +    |
| Opaakki      | +    |
| Karbonaatit  | +    |
| Kloriitti    | +    |



Raekooltaan kivi on pieni - karkearakeinen (0.1 - 5 mm, ka 0.3 mm). Mineralogialtaan kivi ei ole rapautumisaltis. Karbonaattien satunnainen esiintyminen ei vaikuta olennaisesti kiven rapautumisominaisuuksiin.

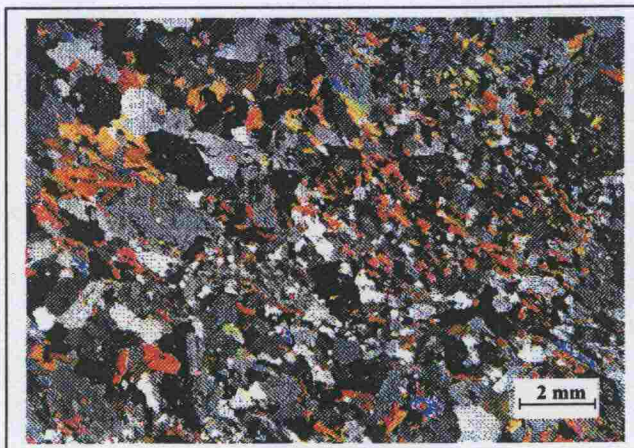
**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasihajarakkeet ovat raekooltaan 1-5 mm ja perusmassa on raekooltaan noin 0.1 mm. Plagioklaasiporfyryrit, jotka saattavat koostua useasta rakeesta, ovat raerajoiltaan aaltomaisia tai lahdekkeisia ja ne esiintyvät perusmassan ympäröiminä. Pienirakeisen lujan perusmassan välityksellä ympäristöönsä liittyneet hajarakkeet ja mineraalien tasainen jakauma aiheuttavat kiveen lujan rakenteen. Kvartsin pieni määrä heikentää hieman hiovan kulutuksen kestoa.

## SEINÄJOKI - KOKKOLA , Tukikerros

## KIILLEGNEISSI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 40 % |
| Kvartsi      | 35 % |
| Biotiitti    | 20 % |
| Muskoviitti  | 5 %  |
| Kloriitti    | +    |
| Epidootti    | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Opaakki      | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on raekooltaan keskirakeinen (0.1 - 3 mm , ka. 0.7 mm). Kivi ei ole mineralogialtaan rapautumisherkkä.

**Rakenne ja lujuus**

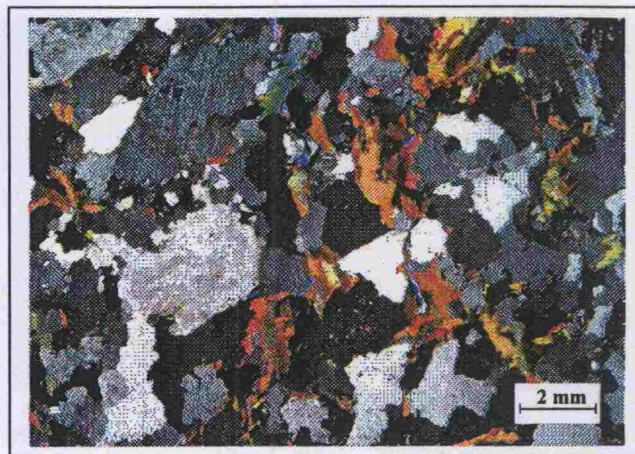
Plagioklaasi ja kvartsi esiintyvät enimmäkseen vierasmuotoisina rakeina. Biotiitti esiintyy suureksi osaksi osittain omamuotoisina rakeina noin 1 mm:n pituisina nauhoinaplagioklaasi- ja kvartsirakeiden väleissä. Näytteessä mineraalit ovat liittyneet toisiinsa suorahkoin tai hieman aaltomaisin raerajoin. Rakenteeltaan kivi on selvästi liuskeinen. Biotiitin runsaus heikentää kiven kulutuskestävyyttä samoin kuin mineraalien yhteenliittymistapa, joka ei ole erityisen tiukka.



## SEINÄJOKI - KOKKOLA , Kovjoen louhos (Harmaa)

## TONALIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 45 % |
| Kvartsi      | 40 % |
| Biotiitti    | 15 % |
| Sarvivälke   | +    |
| Kloriitti    | +    |
| Opaakki      | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on rakkooltaan keski-karkearakeinen (0.2 mm -10 mm, ka. 2 mm)

Kokonaisuudessaan muuttuminen on paikoittaista eikä näyte ole mineralogialtaan rapautumisaltis.

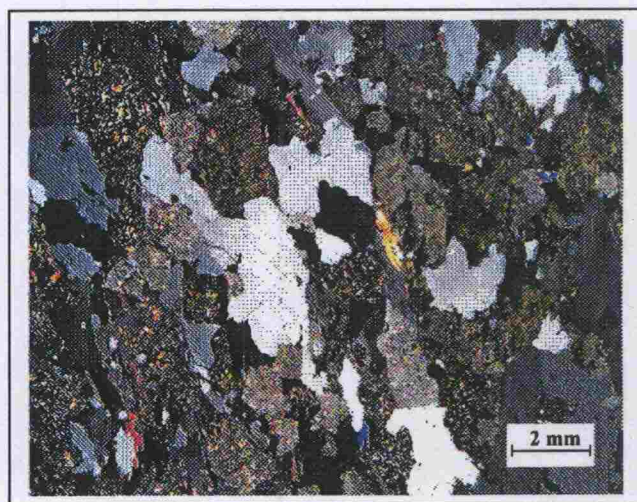
**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasi muodostaa suuria porfyyrisiä rakeita ja biotiitti esiintyy pieninä kasaumina maasälpä- ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen suorahkoin tai aaltomaisin raerajoin. Rakenne on porfyyrinen ja hieman suuntautunut. Hauraiden mineraalien runsaus sekä mineraalien hiukan epätasainen jakauma ja karkearakeisuus heikentävät kiven iskunkestävyyttä. Kestävyys hiovaa kulutusta vastaan on hyvä johtuen kovien mineraalien suuresta osuudesta.

## SEINÄJOKI - KOKKOLA, Kovjoen louhos (Punertava)

## TONALIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 55 % |
| Kvartsi      | 40 % |
| Biotiitti    | 5 %  |
| Sarvivälke   | +    |
| Kloriitti    | +    |
| Opaakki      | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on rakkooltaan keski-karkearakeinen (0.2 mm -10 mm, ka. 3 mm)

Plagioklaasi on muuttunut osittain serisiitiksi. Kokonaisuudessaan plagioklaasin serisiittyminen ei vaikuta olennaisesti rapautumisalttiuteen.

**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasi muodostaa suuria porfyyrisiä rakeita. Biotiitti esiintyy pieninä kasaumina maasälpärakeiden ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen suorahkoin tai aaltomaisin raerajoin. Rakenne on porfyyrinen ja hieman suuntautunut. Hauraiden mineraalien runsaus sekä mineraalien hiukan epätasainen jakauma ja karkearakeisuus heikentävät kiven iskunkestävyyttä. Kestävyys hiovaa kulutusta vastaan on hyvä johtuen kovien mineraalien suuresta osuudesta.



## SEINÄJOKI - KOKKOLA , Tukikerros

## APLIITTIGRANIITTI

Plagioklaasi + kalimaasälpä 50 %

Kvartsi 43 %

Biotiitti 7 %

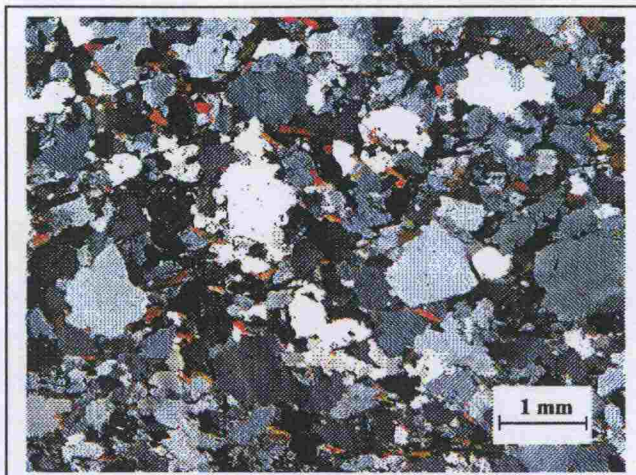
Opaakki +

Serisiitti +

Titaniitti +

Apatiitti +

Zirkoni +



Kivi on raekooltaan pienirakeinen (0.1 mm - 3 mm, ka. 0.3 mm), ja näyte ei ole mineralogialtaan rapautumisaltis.

**Rakenne ja lujuus**

Maasälvät esiintyvät suurimmaksi osaksi vierasmuotoisina rakeina, joilla on aaltoilevat tai lahdekkeiset raerajat. Biotiitti esiintyy suhteellisen tasaisesti jakautuneena maasälpä- ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen aaltomaisin ja lahdekkeisin raerajoin. Mineraalien muodoissa vierasmuotoisuus on hallitsevaa. Pieni raekoko ja luja mineraalien yhteenliittymistapa vaikuttavat kiven iskulujuutta lisäävästi, kvartsin runsaus aiheuttaa hyvän kestävyuden hiovaa kulutusta vastaan.

## SEINÄJOKI - KOKKOLA, Tukikerros

## GRANIITTI

Plagioklaasi 30 %

Kvartsi 35 %

Kalimaasälpä 25 %

Biotiitti 10 %

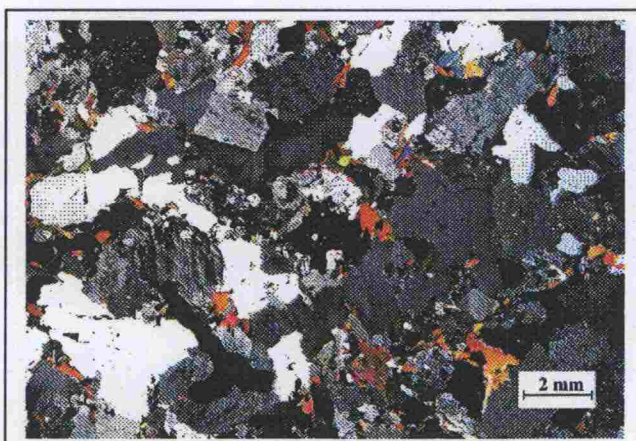
Opaakki +

Serisiitti +

Titaniitti +

Apatiitti +

Zirkoni +



Kivi on raekooltaan keski-karkearakeinen (0.2 mm - 4 mm, ka. 1.2 mm ). Kokonaisuudessaan muuttuminen on paikoittaista eikä näyte ole rapautumisaltis.

**Rakenne ja lujuus**

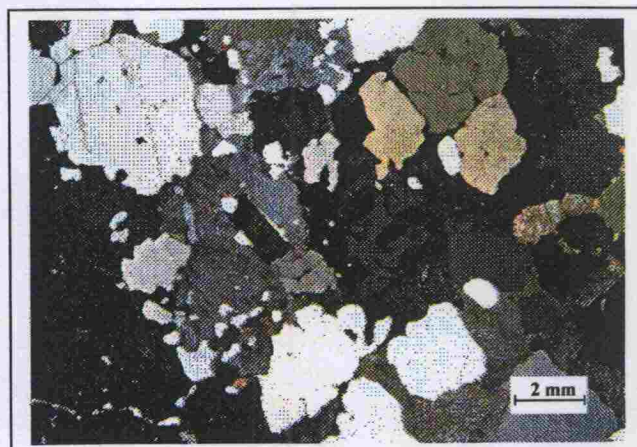
Mineraalit ovat suurimmaksi osaksi lähes vierasmuotoisia ja suhteellisen tasaisesti jakautuneita. Biotiitti esiintyy kasaumina maasälpärakeiden ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen aaltomaisin tai lahdekkeisin raerajoin. Näyte on lähes suuntautumaton. Mineraalien suhteellisen luja yhteenliittymistapa ja mineraalien tasainen jakauma lisäävät kiven lujuutta. Hauraiden mineraalien runsaus sekä mineraalien karkearakeisuus heikentävät puolestaan hieman kiven iskunkestävyyttä.



## KOUVOLA - LUUMÄKI, Tukikerros

## RAPAKIVIGRANIITTI (PYTERLIITTI)

|              |      |
|--------------|------|
| Kalimaasälpä | 35 % |
| Kvartsi      | 30%  |
| Plagioklaasi | 28 % |
| Biotiitti    | 7 %  |
| Sarvivälke   | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Saussuriitti | +    |
| Epidootti    | +    |
| Opaakki      | +    |
| Titaniitti   | +    |



Kivi on raekooltaan keski- karkearakeinen 0.2 mm - 65 mm. Mineralogian perusteella kiven rapautumiskestävyys on hyvä.

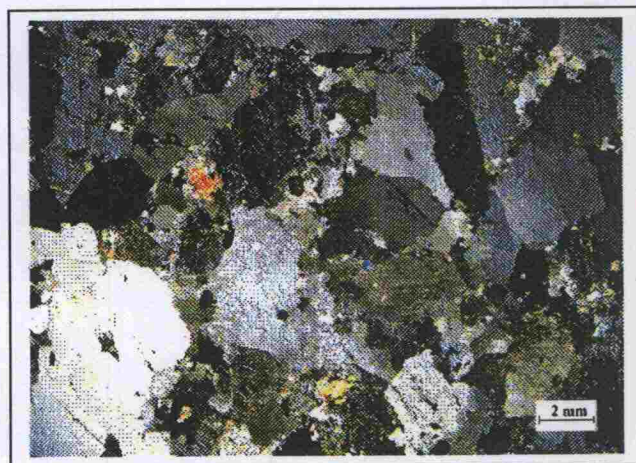
**Rakenne ja lujuus**

Kalimaasälpä esiintyy kookkaina osittain omamuotoisina ovoideina. Plagioklaasi, biotiitti ja kvartsi esiintyvät kasaumina kalimaasälpärakeiden välitiloissa. Biotiitti ja kvartsi ovat vierasmuotoisia, plagioklaasi on paikoin osittain omamuotoinen. Kokonaisuudessaan kiven rakennetta hallitsevat kookkaat kalimaasälpärakeet. Muutamissa suurissa kalimaasälpärakeissa esiintyy hieman mikrorakoilua. Kiven rakenne on heikohko, mikä johtuu rakeiden yhteenliittymisestä suorahkoin tai aaltomaisin rajapinnoin, suuresta raekoosta ja mikrorakoilusta.

## KOUVOLA-LUUMÄKI, Hillosensalmen louhos

## GRANIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 25 % |
| Kvartsi      | 35 % |
| Kalimaasälpä | 35 % |
| Biotiitti    | 5 %  |
| Opaakki      | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on raekooltaan keski-karkearakeinen (0.2 mm - 7 mm, ka. 3 mm, ). Kokonaisuudessaan muuttuminen on paikoittaista eikä näyte ole mineralogialtaan rapautumisaltis.

**Rakenne ja lujuus**

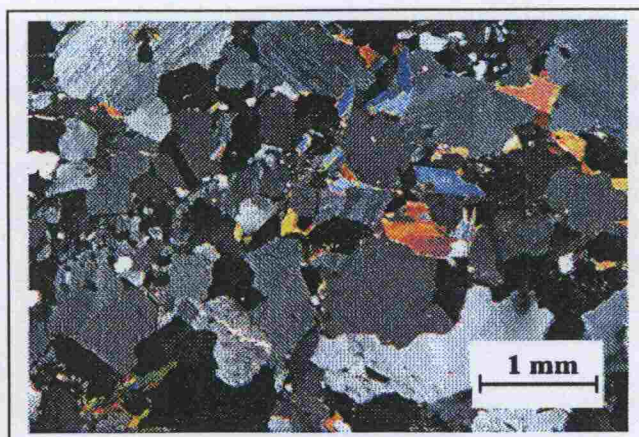
Kvartsi esiintyy monin paikoin kookkaina vierasmuotoisina pitkulaisina rakeina, samoin kuin kalimaasälpä. Biotiitti esiintyy kasaumina maasälpärakeiden ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen suorahkoin tai aaltomaisin raerajoin. Mineraalit ovat selvästi suuntautuneet, mikä ilmenee erityisesti pitkänomaisina kvartsirakeina. Hauraiden mineraalien runsaus, suuri raekoko ja kalimaasälvässä esiintyvät mikroraot heikentävät selvästi kiven iskunkestävyyttä. Hiovan kulutuksen kesto kivessä on hyvä



## KOUVOLA - LUUMÄKI, Tukikerros

## TONALIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 50 % |
| Kvartsi      | 40 % |
| Biotiitti    | 10 % |
| Opaakki      | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on raekooltaan keski-karkearakeinen (0.1 mm - 1.2 mm, ka. 0.5 mm) ja kivessä mineraalien muuttuminen on kokonaisuudessaan satunnaista eikä näyte ole siten mineralogialtaan rapautumisaltis

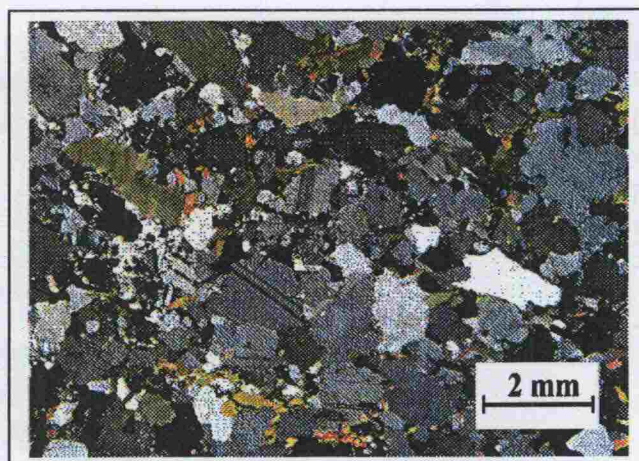
**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasi on suurimmaksi osaksi lähes vierasmuotoinen samoin kuin biotiitti ja kvartsi. Biotiitti esiintyy suhteellisen tasaisesti jakautuneena plagioklaasi- ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen aaltomaisin raerajoin. Mineraalien suhteellisen luja yhteenliittymistapa ja pieni raekoko lisäävät kiven kestävyyttä iskevää kulutusta vastaan. Biotiitin vähäisyys yhdessä pienen raekoon kanssa aiheuttavat hyvän hioutuvuuden keston.

## KOUVOLA - LUUMÄKI, Kerimäen louhos

## TONALIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 45 % |
| Kvartsi      | 45 % |
| Biotiitti    | 10 % |
| Opaakki      | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on raekooltaan pieni-keskirakeinen (0.1 mm - 6 mm, ka. 0.7 mm). Kivi ei ole mineralogialtaan rapautumisherkkä.

**Rakenne ja lujuus**

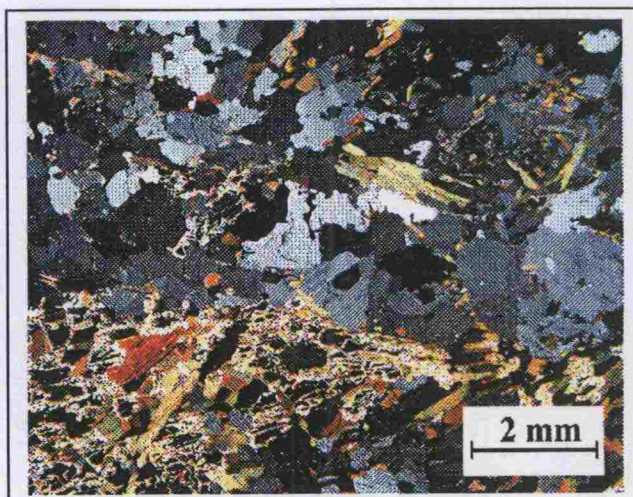
Plagioklaasi ja kvartsi esiintyvät enimmäkseen vierasmuotoisina rakeina. Biotiitti esiintyy osittain omamuotoisena puristuneena kasaumiksi plagioklaasi- ja kvartsirakeiden väleihin. Näytteessä mineraalit ovat liittyneet toisiinsa aaltomaisin raerajoin ja mineraalit esiintyvät suhteellisen tasaisesti jakautuneina. Rakeiden yhteenliittymistapa on melko tiukka. Hauraiden mineraalien runsaus ja vaikuttaa kiven iskulujuutta heikentävään suuntaan. Hiovan kulutuksen kesto on hyvä johtuen biotiitin pienestä osuudesta.



## KOUVOLA - LUUMÄKI, Radan pinta

## GRANIITTIGNEISSI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 32 % |
| Kvartsi      | 30 % |
| Biotiitti    | 15 % |
| Kalimaasälpä | 5 %  |
| Kordieriitti | 10 % |
| Opaakki      | 3 %  |



Kivi on rakkooltaan keskirakeinen (0.1 mm - 5 mm, ka. 1.0 mm, Kivi ei ole mineralogialtaan rapautumisherkkä.

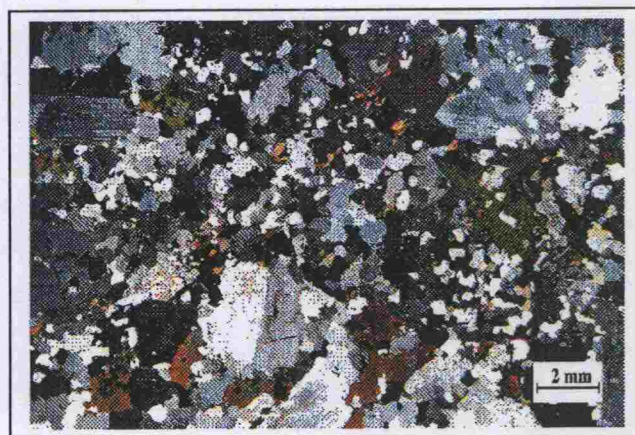
**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasi ja kvartsi esiintyvät enimmäkseen vierasmuotoisina rakeina. Biotiitti esiintyy osittain omamuotoisena raitamaisesti jakautuneena koko näytteen alueella. Näytteessä mineraalit ovat liittyneet toisiinsa biotiittia lukuunottamatta aaltomaisin raerajoin. Mineraalit ovat selvästi hieman suuntautuneet ja näytteessä esiintyy raitamaista koostumusvaihtelua. Maasälpä- ja kvartsirakeiden yhteenliittymistapa on suhteellisen tiukka. Hauraiden mineraalien runsaus ja karkearakeisuus vaikuttaa kiven lujuusominaisuuksia heikentävään suuntaan samoin kuin liuskeisuus.

## KOUVOLA-LUUMÄKI, Tukikerros

## SARVIVÄLKERAPAKIVI

|              |      |
|--------------|------|
| Kalimaasälpä | 25 % |
| Plagioklaasi | 27 % |
| Kvartsi      | 25 % |
| Sarvivälke   | 5 %  |
| Biotiitti    | 15 % |
| Opaakki      | 3 %  |
| Pyrokseenit  | +    |
| Uraliitti    | +    |



Kivi on rakkooltaan keski -karkearakeinen (<0.5 - 7 mm, ka 1.5 mm) Näytteessä ei ole rapautumisalttiita mineraaleja.

**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasi ja kvartsi esiintyvät säännönmukaisesti suurina rakeina. Suurien mineraalirakeiden ympärillä rakeet esiintyvät tasaisesti jakaantuneena keskimääräisen rakkoon ollessa 0,7 mm. Rakeet ovat liittyneet yhteen aaltomaisin raerajoin. Kiven rakenne on rapakiville tyypillisesti suuntautumaton. Rakenteeltaan kivi on rapakiveksi melko luja, mikä johtuu rakeiden yhteenliittymisestä aaltomaisin rajapinnoin ja pienestä rakoosta. Sarvivälkkeen runsaus vaikuttaa kiven iskunkestävyyttä lisäävään suuntaan.



**KOUVOLA - LUUMÄKI, Tukikerros****EMÄKSINEN VULKANIITTI**

|                        |      |
|------------------------|------|
| Sarvivälke             | 45 % |
| Plagioklaasi + kvartsi | 53 % |
| Opaakki                | 2 %  |
| Serisiitti             | +    |



Kivi on raekooltaan hienorakeinen (0.05 mm - 0.5 mm, ka. 0.2 mm), ja näyte ei ole mineralogialtaan rapautumisaltis

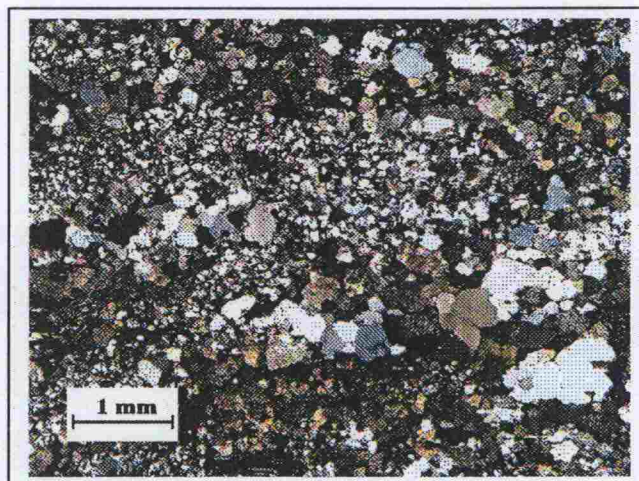
**Rakenne ja lujuus**

Mineraalit ovat suurimmaksi osaksi vierasmuotoisia ja liittyneet toisiinsa aaltomaisin raerajoin. Mikroskooppisesti kiven mineraalit esiintyvät melko tasaisesti jakaantuneina.

Mineraalien liittyminen toisiinsa melko tiukasti lisää kiven iskunkestävyyttä, lisäksi kivellä on lujuuden kannalta edullinen raekoko.

**KOSKENKYLÄ, LOUHOS****TONALIITTI**

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 40 % |
| Kvartsi      | 40 % |
| Biotiitti    | 17 % |
| Sarvivälke   | 3 %  |
| Kloriitti    | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Opaakki      | +    |



Kivi on raekooltaan pienirakeinen (0.1 mm - 4 mm, ka. 0.3 mm). Plagioklaasissa serisiittiytyminen on yleistä, paikoin plagioklaasi on serisiittiytynyt melkein kauttaaltaan. Plagioklaasin arvioitu serisiittiytymisaste on noin 50 %, Biotiitti on osittain kloriittiutunut lohkoraosta alkaen.

**Rakenne ja lujuus**

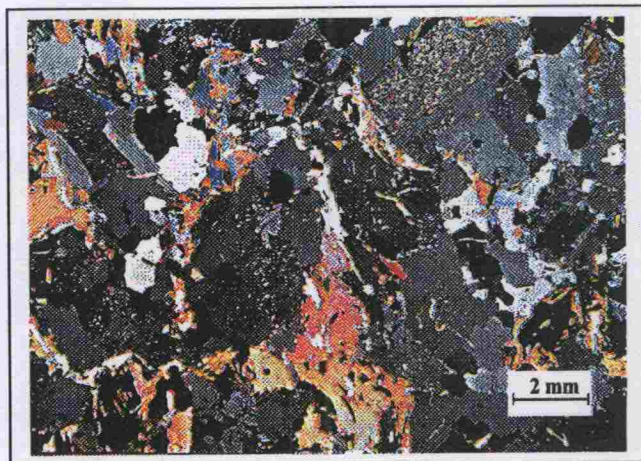
Plagioklaasi esiintyy suurimmaksi osaksi vierasmuotoisina rakeina, joilla on aaltoilevat raerajat. Biotiitti esiintyy ohuina katkonaisina nauhoina osittain omamuotoisina rakeina. Suurien rakeiden väleissä esiintyy runsaasti pienirakeista raemassaa, joka koostuu vierasmuotoisista kvartseista ja plagioklaasista. Näyte on selvästi suuntautunut. Pieni raekoko ja luja mineraalien yhteenliittymistapa vaikuttavat kiven iskulujuutta lisäävästi. Plagioklaasirakeiden serisiittiytymisen lisäksi maasälpien sitkeyttä vaikuttaen siten iskulujuutta kasvattavaan suuntaan. Kvartsin runsaus aiheuttaa hyvän hioutumiskestävyyden.



## TAMPERE - ORIVESI, Siitaman louhos

## TONALIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 45 % |
| Kvartsi      | 40 % |
| Biotiitti    | 15 % |
| Sarvivälke   | +    |
| Kloriitti    | +    |
| Opaakki      | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on rækooltaan keski-karkearakeinen (0.2 mm -5 mm, ka. 1.5 mm).

Kokonaisuudessaan muuttuminen on paikoittaista eikä näyte ole mineralogialtaan rapautumisaltis.

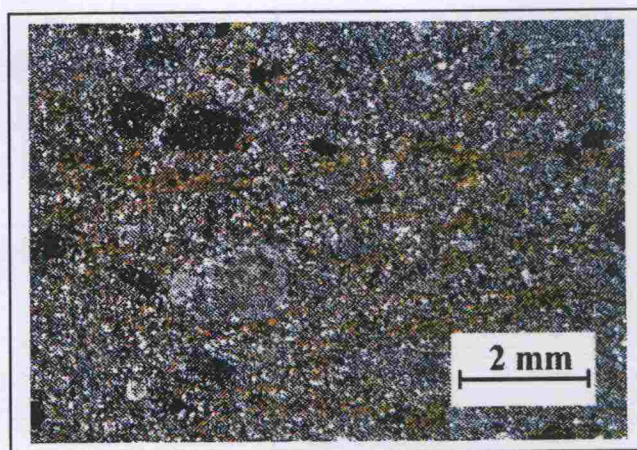
## Rakenne ja lujuus

Plagioklaasi on suurimmaksi osaksi lähes vierasmuotoinen ja biotiitti on osittain omamuotoinen. Biotiitti esiintyy kasaumina ja nauhoina maasälpärakeiden ja kvartsirakeiden välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen pääasiassa suorahkoin raerajoin. Rakenne on porfyyrinen ja hieman suuntautunut. Hauraiden mineraalien runsaus, mineraalien hiukan epätasainen jakauma, karkearakeisuus ja mineraalien suhteellisen heikohko yhteenliittymistapa heikentävät kiven iskunkestävyyttä.

## TAMPERE - ORIVESI

## HAPAN VULKANIITTI

|                        |      |
|------------------------|------|
| Kvartsi + plagioklaasi | 70 % |
| Biotiitti              | 25 % |
| Kloriitti              | 5 %  |
| Sarvivälke             | +    |
| Titaniitti             | +    |
| Opaakki                | +    |
| Serisiitti             | +    |



Kivi on rækooltaan hienorakeinen (<0.05 mm - 1 mm, ka. 0.1 mm), plagioklaasihajarakeet 1mm. Hieessä on havaittavissa paikoin karbonaatteja ja biotiitti on muuttunut jonkin verran kloriitiksi. Kokonaisuudessaan kivi ei ole erityisen rapautumisaltis.

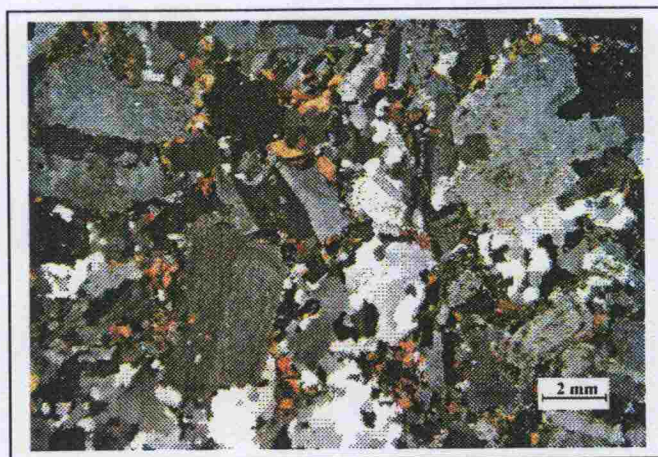
Kivi on selvästi suuntautunut, mineraalirakeet esiintyvät suhteellisen tasaisesti jakautuneina. Biotiitti esiintyy säännönmukaisesti nauhamaisina kasaumina. Mineraalien yhteenliittymistapa on melko luja, mutta biotiitin korkeahko määrä pienentää hiovan kulutuksen kestävyyttä.



## TAMPERE-ORIVESI, Sorilan louhos

## GRANIITTI

|              |      |
|--------------|------|
| Plagioklaasi | 45 % |
| Kvartsi      | 25 % |
| Kalimaasälpä | 15 % |
| Biotiitti    | 10 % |
| Sarvivälke   | 5 %  |
| Opaakki      | +    |
| Kloriitti    | +    |
| Serisiitti   | +    |
| Titaniitti   | +    |
| Apatiitti    | +    |
| Zirkoni      | +    |



Kivi on rakkooltaan keski-karkearakeinen (0.2 mm - 5.5 mm, ka. 0.7 mm )  
Kokonaisuudessaan muuttuminen on paikoittaista eikä näyte ole rapautumisaltis.

**Rakenne ja lujuus**

Plagioklaasi on suurimmaksi osaksi lähes vierasmuotoinen ja biotiitti on osittain omamuotoinen. Kvartsi esiintyy enimmäkseen noin 1 -2 mm monomineraalisina kasaumina. Biotiitti ja sarvivälke esiintyvät pieninä kasaumina plagiolaasirakeiden ja kvartsirackasaumien välitiloissa. Mineraalit ovat liittyneet yhteen aaltomaisin tai lahdekkeisin raerajoin. Mineraalien suhteellisen tiukka yhteenliittymistapa lisää kiven lujuutta, mutta hauraiden mineraalien runsaus sekä mineraalien hiukan epätasainen jakauma heikentävät hieman kiven rakennetta

- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
- 2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
- 3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
- 4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
- 5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
- 1/1998 Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutusselvitys
- 2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
- 3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
- 4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
- 5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
- 6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankkeissa
- 1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
- 2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset
- 3/1999 Rautatieliikenteen aiheuttama värinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
- 4/1999 Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
- 5/1999 Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa
- 6/1999 Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
- 7/1999 Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-Haaparanta akselipainojen korottamista varten
- 8/1999 Ratarumpujen maastoselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
- 1/2000 Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti
- 2/2000 Bantrummor, 250 kN och 300 kN axellaster
- 3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus

RATAHALLINTOKESKUS  
KAIVOKATU 6, PL 185  
00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Pasi Leimi, puh. (09) 5840 5184, sähköposti: pasi.leimi@rhk.fi  
Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-032-1  
ISSN 1455-2604